

Document downloaded from:

<http://hdl.handle.net/10251/144260>

This paper must be cited as:

Aguirre Gómez, FA. (2020). Diseño Optimizado, Modelado Dinámico - Cinemático y Fabricación de un AUV, Integrando Herramientas CAE para su Validación [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/144260>



The final publication is available at

Copyright Universitat Politècnica de València

Additional Information

TESIS DOCTORAL

DISEÑO, FABRICACIÓN Y GESTIÓN
DE PROYECTOS INDUSTRIALES



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



INSTITUTO
DE DISEÑO Y
FABRICACIÓN

Diseño Optimizado, Modelado Dinámico - Cinemático y Fabricación de un AUV, Integrando Herramientas CAE para su Validación

PRESENTADO POR:

D. Fredy Alexander Aguirre Gómez

DIRECTOR:

D. Dr. Josep Tornero Monserrat

Valencia, Febrero de 2020

*Los científicos estudian
el mundo tal y como es;
los ingenieros crean el
mundo que nunca ha sido.*

Theodore Von Karman

*Una máquina puede hacer el trabajo
de cien hombres normales,
pero ninguna máquina
puede hacer el trabajo de
un hombre extraordinario.*

Elbert Hubbard



AGRADECIMIENTOS

Este documento supone la culminación del trabajo desarrollado durante los últimos cinco años, y que no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de mi familia.

Quisiera agradecer a mi director Josep Tornero Monserrat, por su apoyo oportuno y el liderazgo que lo caracteriza, del cual me vi beneficiado por la orientación que me brindo en todo momento.

También agradezco al ministerio de educación pues gracias a los recursos destinados al proyecto DIVISAMOS todo este proyecto fue posible.

A todos los compañeros del Instituto de Diseño y Fabricación IDF Ernesto, Vicent, Pau, Cristina, Pepe, Mario, Luis, Leopoldo con quienes compartí y aprendí.

RESUMEN

La robótica submarina ha sido uno de los campos de investigación que más interés ha despertado en las últimas décadas y con esto ha logrado una evolución de dicho campo. Avances de la robótica submarina han sido implementados en áreas diferentes a la investigación, dentro de los beneficiados está el sector comercial y el sector militar, así como la academia. Por otra parte, avances tecnológicos de diferentes áreas se incorporan a la robótica submarina, principalmente en los sistemas electrónicos los que más estimulan el desarrollo de todo lo relacionado con los vehículos submarinos, por lo tanto, se generan progresos en sistemas de control además del diseño mecánico y estructural.

Esta tesis se centró en el diseño y construcción de un vehículo autónomo submarino para el proyecto DIVISAMOS. A partir del análisis del estado actual de la robótica submarina, el diseño planteado recoge todos los aspectos favorables de los vehículos existentes, de esta forma se tienen características que optimizan el vehículo, otorgándole versatilidad y eficiencia de funcionamiento. En el proceso investigativo se dirigieron esfuerzos, principalmente a la integración de métodos de diseño mecánico que optimizaron las características del vehículo que se construyó, presentando así un vehículo híbrido con desplazamientos eficientes y con posibilidad de desarrollar misiones que requieran hovering. Cabe destacar que los métodos de diseño presentados en esta tesis, permiten incorporar sistemas de sensores para desarrollo de misiones de monitoreo, Localización y Mapeo Simultáneos (*SLAM*, por sus siglas en inglés) batimetría de ambientes submarinos con generación de datos georreferenciados, de alta resolución y su proyección cartográfica. Con todo esto se puede asegurar que se construyó un vehículo de altas prestaciones.

Con el análisis de los resultados obtenidos con la implementación de Dinámica de Fluidos Computacional (*CFD, por sus siglas en inglés*), se logró que el vehículo tenga bajo consumo de energía ya que se han estudiado a fondo aspectos de la forma hidrodinámica del casco, del vehículo para reducir la fuerza de arrastre. Dentro de los resultados a desatacar en este aspecto se presenta un modelo que incorpora el cálculo en tiempo real, de las fuerzas debidas al arrastre generado por las corrientes de agua que interactúan con el casco del vehículo, reduciendo con esto el alto costo computacional de los análisis CFD y enriqueciendo el modelado dinámico.

El modelo dinámico y cinemático de un vehículo autónomo submarino (AUV, *por sus siglas en inglés*), reviste un mayor grado de complejidad debido a que al sumergirse, depende de la navegación inercial que funciona basada en las mediciones de los instrumentos y los sistemas de referencia para determinar su posición. Las matrices de transformación son un método eficaz, usado para el modelado matemático de brazos robot, en esta tesis se plateó un modelo matemático híbrido, que utiliza matrices de transformación para plantear la cinemática del AUV, éste modelo tiene la particularidad de permitir agregar elementos al modelo inicial, continuando con la misma formulación resultando de gran utilidad para casos en los que el AUV realiza misiones en las que manipulan objetos y debido a esto se incorpora un brazo robot.

ABSTRAC

Underwater robotics has been one of the fields of research that has awakened most in recent decades, this has achieved an evolution of this field. Advances in underwater robotics have been implemented in areas other than research, within the benefits are the commercial sector and the military sector as well as the academy. Underwater robotics has been one of the fields of research that has awakened most in recent decades, this has achieved an evolution of this field. Advances in underwater robotics have been implemented in areas other than research, within the benefits is the commercial sector and the military sector as well as the academy.

The development of everything related to underwater vehicles, therefore progress is made in control systems in addition to the mechanical and structural design. This thesis focused on the design and construction of an underwater autonomous vehicle for the DIVISAMOS project. From the analysis of the current state of underwater robotics, the proposed design includes all the favorable aspects of the existing vehicles, in this way it has characteristics that optimize the vehicle, giving it versatility and efficiency of operation. In the research process, it was mainly aimed at the integration of mechanical design methods that optimize the characteristics of the vehicle that was built, thus presenting a hybrid truck with efficient displacements and the possibility of development. It should be noted that the design methods presented in this test incorporate sensor systems for the development of monitoring missions, Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), the bathymetry of submarine environments with high-resolution georeferenced data generation and its cartographic projection. With all this you can ensure that a high-performance vehicle was built.

With the analysis of the results obtained with the implementation of Computational Fluid Dynamics (CFD) was achieved that the vehicle

has low power consumption and that has been thoroughly studied aspects of the hydrodynamic shape of the vehicle's hull to reduce the drag force. Within the results of this aspect a model is presented that incorporates the calculation in real time of the forces for the analysis of the drag generated by the water currents that interact with the hull of the vehicle, reducing with this the high computational cost of the CFD analysis and enriching dynamic modeling.

The dynamic and kinematic model of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) revises a greater degree of complexity that depends on the inertial navigation that works in the measurements of the instruments and the reference to determine its position. Transformation matrices are an effective method used for the mathematical modeling of robot arms. In this thesis a hybrid mathematical model was used that uses transformation matrices to propose the kinematics of the AUV, this model has the peculiarity of allowing the aggregation of elements to the initial model continuing with the same formulation, resulting in a great utility for cases in which the AUV performs missions in which objects are manipulated and due to this incorporates an arm robot.

RESUM

La robòtica submarina ha sigut un dels camps d'investigació que més interès ha despertat en les últimes dècades, açò ha aconseguit una evolució del dit camp. Avanços de la robòtica submarina han sigut implementats en àrees diferents de la investigació, dins dels beneficiats està el sector comercial i el sector militar així com l'acadèmia. D'altra banda, avanços tecnològics de diferents àrees s'incorporen a la robòtica submarina, principalment són els sistemes electrònics els que més estimulen el desenrotllament de tot allò que s'ha relacionat amb els vehicles submarins, per tant es generen progressos en sistemes de control a més del disseny mecànic i estructural.

Esta tesi es va centrar en el disseny i construcció d'un vehicle autònom submarí per al projecte DIVISAMOS. A partir de l'anàlisi de l'estat actual de la robòtica submarina, el disseny plantejat arreplega tots els aspectes favorables dels vehicles existents, d'esta manera es tenen característiques que optimitzen el vehicle atorgant-li versatilitat i eficiència de funcionament. En el procés investigatiu es van dirigir esforços principalment a la integració de mètodes de disseny mecànic que van optimitzar les característiques del vehicle que es va construir, presentant així un vehicle híbrid amb desplaçaments eficients i possibilitat de desenrotllar missions que requereixen hovering. Cal destacar que els mètodes de disseny presentats en esta tesi permeten incorporar sistemes de sensors per a desenrotllament de missions de monitoreo, SLAM, batimetria d'ambients submarins amb generació de dades geo-referenciats d'alta resolució i la seua projecció cartogràfica. Amb tot açò es pot assegurar que es va construir un vehicle d'altres prestacions.

Amb l'anàlisi dels resultats obtinguts amb la implementació de Dinàmica de Fluids Computacional (CFD, per les seues sigles en anglés) es va aconseguir que el vehicle tinga baix consum d'energia ja que s'han estudiat a fons aspectes de la forma hidrodinàmica del casc del vehicle

per a reduir la força d'arrossegament. Dins dels resultats a descordar en este aspecte es presenta un model que incorpora el càlcul en temps real de les forces degudes a l'arrossegament generat pels corrents d'aigua que interactuen amb el casc del vehicle, reduint amb açò l'alt cost computacional de les anàlisis CFD i enriquint el modelatge dinàmic

El model dinàmic i cinemàtic d'un Vehicle Autònom Submarí (AUV, per les seues sigles en anglés) revist un major grau de complexitat pel fet que al submergir-se depén de la navegació inercial que funciona basada en els mesuraments dels instruments i els sistemes de referència per a determinar la seua posició. Les matrius de transformació són un mètode eficaç usat per al modelatge matemàtic de braços robot, en esta tesi es va platejar un model matemàtic híbrid que utilitza matrius de transformació per a plantejar la cinemàtica del' AUV, este model té la particularitat de permetre agregar elements al model inicial continuant amb la mateixa formulació, resultant gran utilitat per a casos en què l'AUV realitza missions en què manipulen objectes i a causa d'açò incorpora un braç robot.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	VIII
RESUMEN	X
ABSTRAC	XII
RESUM	XIV
ÍNDICE	XVIII
ÍNDICE FIGURAS	XXII
ÍNDICE TABLAS	XXVI
LISTA DE ABREVIACIONES	XXVIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XXX
INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	36
INTRODUCCIÓN	36
OBJETIVOS DE LA TESIS	37
ESTRUCTURA DE LA TESIS	38
CAPÍTULO 1	42
1 ESTADO DEL ARTE	44
1.1 LA ROBÓTICA EN LA INVESTIGACIÓN SUBMARINA	44
1.2 LOS AUV Y SUS MISIONES	47
1.3 ESPECIFICACIONES FUNCIONALES DE LOS AUV	52
1.4 ALGUNOS DE LOS AUV EXISTENTES	57
1.5 CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	60
1.6 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DINÁMICO Y CINEMÁTICO	69
CAPÍTULO 2	74
2 DISEÑO MECÁNICO DEL AUV	76
2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO	77
2.2 DISEÑO DEL CASCO	78
2.2.1 Casco hidrostático	80
2.2.2 Casco hidrodinámico	92
2.3 ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DEL CASCO	99

2.3.1	<i>Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando la relación L/D</i>	101
2.3.2	<i>Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando el tramo recto</i>	104
2.3.3	<i>Análisis de diferentes ángulos de incidencia del fluido</i>	105
2.4	PROPUESTA DE DISEÑO	114
2.5	SISTEMA DE PROPULSIÓN	119
2.5.1	<i>Calculo de la potencia requerida</i>	119
2.5.2	<i>Selección de los propulsores</i>	120
2.6	SISTEMA DE SENSORIZACIÓN (UBICACIÓN)	123
2.6.1	<i>Sensor de señal acustica</i>	124
2.6.2	<i>Sistema de visión</i>	126
2.6.3	<i>Unidad de medición inercia</i>	128
2.6.4	<i>GPS</i>	128
2.7	DISEÑO DEFINITIVO	130
CAPÍTULO 3		134
3	FABRICACIÓN DEL AUV	136
3.1	SELECCIÓN DE MATERIALES Y MÉTODO DE FABRICACIÓN	137
3.2	PROCESO DE FABRICACIÓN DE MOLDES	138
3.3	ACTIVIDADES DE FABRICACIÓN	139
CAPÍTULO 4		146
4	MODELADO DINÁMICO CINEMÁTICO	148
4.1	PLANTEAMIENTO DEL MODELADO DEL AUV	149
4.1.1	<i>Aspectos físicos para el modelo dinámico y cinemático</i>	152
4.1.2	<i>Obtención de los parámetros de Denavit – Hartenberg</i>	152
4.1.3	<i>Obtención de las matrices de transformación para el AUV</i>	156
4.1.4	<i>Ecuaciones cinemáticas del AUV</i>	157
4.1.5	<i>Cinemática directa del AUV</i>	161
4.1.6	<i>Cinemática inversa del AUV</i>	163
4.1.7	<i>Cálculo de la velocidad del AUV</i>	167
4.1.8	<i>Cálculo de la aceleración del AUV</i>	169
4.1.9	<i>Calculo de la dinámica del AUV</i>	172
4.1.10	<i>Calculo de la energía cinética del AUV</i>	174
4.1.11	<i>Energía potencial del AUV</i>	182
4.1.12	<i>Ecuaciones de movimiento del AUV</i>	183
4.1.13	<i>Cálculo del vector de fuerza de coriolis y centrifuga</i>	193

4.2	SIMULACIÓN E INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS CFD EN EL MODELO DEL AUV	211
4.2.1	<i>Componentes de la fuerza hidrodinámica</i>	211
4.2.2	<i>Momentos debidos a la fuerza hidrodinámica</i>	216
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	220
4.3.1	<i>Variación de la velocidad de la corriente</i>	220
4.3.2	<i>Resultados de las pruebas iniciales para la validación del modelado dinámico y cinemático</i>	222
CAPÍTULO 5		230
5	RESULTADOS, PARTICIPACIÓN EN EVENTOS CIENTÍFICOS Y PUBLICACIONES EN REVISTAS CIENTÍFICAS	232
5.1	PUBLICACIONES EN REVISTAS CIENTÍFICAS	234
5.2	PARTICIPACIÓN EN EVENTOS CIENTÍFICOS	245
CAPÍTULO 6		318
6	CONCLUSIONES, APORTACIONES PRINCIPALES Y LÍNEAS DE FUTURAS INVESTIGACIONES	320
6.1	APORTACIONES PRINCIPALES DEL ESTADO DEL ARTE	321
6.2	APORTACIONES PRINCIPALES EN EL DISEÑO	324
6.3	APORTACIONES PRINCIPALES DE LA FABRICACIÓN	326
6.4	APORTACIONES PRINCIPALES DEL MODELADO DINÁMICO Y CINEMÁTICO	327
6.5	LÍNEAS DE FUTURAS INVESTIGACIONES	328
REFERENCIAS		332

ÍNDICE FIGURAS

<i>Figura 1-1 Búsqueda y vigilancia de pecios.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 1-2 Inspección de tuberías y cables submarinos</i>	<i>50</i>
<i>Figura 1-3 Filmación de documentales para cine y televisión.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 1-4 Inspección de redes de pesca</i>	<i>51</i>
<i>Figura 1-5 Rastreo de minas</i>	<i>52</i>
<i>Figura 1-6 AUV con sistema de energía solar</i>	<i>53</i>
<i>Figura 1-7 Análisis tipo de operación.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 1-8 Material de fabricación del casco.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 1-9 Profundidad de operación.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 1-10 Tipo de misión</i>	<i>64</i>
<i>Figura 1-11 Rango de velocidad</i>	<i>64</i>
<i>Figura 1-12 Forma - Velocidad.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 1-13 Profundidad - material.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 1-14 Profundidad - Tipo funcionamiento</i>	<i>67</i>
<i>Figura 1-15 Material - Velocidad promedio</i>	<i>68</i>
<i>Figura 1-16 Velocidad - Misión</i>	<i>69</i>
<i>Figura 2-1 casco AUV opción 1</i>	<i>78</i>
<i>Figura 2-2 Batería Li-ion.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 2-3 Sistema de alimentación de energía</i>	<i>81</i>
<i>Figura 2-4 Ordenador de abordó.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 2-5 Sistema de brida</i>	<i>88</i>
<i>Figura 2-6 tapa tipo tapón</i>	<i>89</i>
<i>Figura 2-7 Sistema de cierre seleccionado</i>	<i>90</i>
<i>Figura 2-8 Sistema eléctrico.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 2-9 Casco hidrostático y sus componentes</i>	<i>91</i>
<i>Figura 2-10 Relación L/D</i>	<i>93</i>
<i>Figura 2-11 Componentes de la fuerza arrastre sobre el casco.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 2-12 Arrastre en función de la relación L/D</i>	<i>95</i>
<i>Figura 2-13 Cascos ideales</i>	<i>96</i>
<i>Figura 2-14 Diseño tipo gota de agua parametrizado</i>	<i>97</i>
<i>Figura 2-15 Diseño tipo torpedo parametrizado.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 2-16 Esquema del análisis CFD realizado</i>	<i>100</i>
<i>Figura 2-17 Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando la relación L/D.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 2-18 Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando la sección recta</i>	<i>105</i>
<i>Figura 2-19 Corriente en coordenadas esféricas</i>	<i>107</i>

<i>Figura 2-20 Variación ángulos α y β</i>	108
<i>Figura 2-21 Configuración para la simulación variando el ángulo de incidencia</i>	109
<i>Figura 2-22 Resultados de la simulación variando el ángulo de incidencia</i>	110
<i>Figura 2-23 Ubicación de los impulsores vectorizados</i>	115
<i>Figura 2-24 Diseño del casco hidrodinámico</i>	116
<i>Figura 2-25 Acceso para casco hidrostático</i>	117
<i>Figura 2-26 Estructura soporte</i>	117
<i>Figura 2-27 soportes acetal</i>	118
<i>Figura 2-28 Distribución de espuma de alta densidad</i>	119
<i>Figura 2-29 Propulsores seleccionados</i>	122
<i>Figura 2-30 Disposición de los propulsores</i>	123
<i>Figura 2-31 Triton Micron DST</i>	124
<i>Figura 2-32 Resolución del receptor de sonar monotónica</i>	125
<i>Figura 2-33 Resolución del receptor de sonda CHIRP</i>	125
<i>Figura 2-34 Posicionamiento final de los sensores</i>	126
<i>Figura 2-35 Cámara SharkEye 550</i>	127
<i>Figura 2-36 Posicionamiento del sistema de visión</i>	127
<i>Figura 2-37 XSens MT9 IMU</i>	128
<i>Figura 2-38 GPS sumergible es el AD 450</i>	129
<i>Figura 2-39 Diseño definitivo</i>	130
<i>Figura 3-1 Representación de fabricación de moldes</i>	138
<i>Figura 3-2 Fabricación de Molde</i>	139
<i>Figura 3-3 Proceso de lamino con molde abierto</i>	140
<i>Figura 3-4 Casco hidrodinámico fabricado</i>	141
<i>Figura 3-5 Construcción casco hidrostático</i>	142
<i>Figura 3-6 ORCA 300</i>	143
<i>Figura 4-1 Sistemas de referencia</i>	150
<i>Figura 4-2 Esquema sistemas de coordenadas</i>	154
<i>Figura 4-3 Esquema simulink herramienta de simulación</i>	211
<i>Figura 4-4 Componente de la fuerza hidrodinámica en el eje X</i>	213
<i>Figura 4-5 Componente de la fuerza hidrodinámica en el eje Y</i>	215
<i>Figura 4-6 Componente de la fuerza hidrodinámica en el eje Z</i>	216
<i>Figura 4-7 Momentos debidos a la hidrodinámica</i>	217
<i>Figura 4-8 Momento debido a la fuerza hidrodinámica en el eje X (roll)</i>	218
<i>Figura 4-9 Momento debido a la fuerza hidrodinámica en el eje Y (pitch)</i>	219
<i>Figura 4-10 Momento debido a la fuerza hidrodinámica en el eje Z (yaw)</i>	220
<i>Figura 4-11 Velocidad y convergencia de los desplazamientos lineales</i>	221
<i>Figura 4-12 Velocidad y convergencia de los desplazamientos angulares</i>	222
<i>Figura 4-13 Visual servoing</i>	224
<i>Figura 4-14 Posición del ORCA 300 con respecto al objeto deseado</i>	225

<i>Figura 4-15 Acción de control.....</i>	<i>226</i>
<i>Figura 4-16 Comprobación con el ORCA 300.....</i>	<i>227</i>

ÍNDICE TABLAS

<i>Tabla 1-1 Formas representativas.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 1-2 AUV's Españoles.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 1-3 Institutos y Universidades que desarrollan AUV.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 1-4 Muestra UV's para análisis.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 1-5 Relación de los modelos dinámicos y cinemáticos.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 2-1 Propiedades mecánicas.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 2-2 Simulación comportamiento de esfuerzos en casco hidrodinámico</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 2-3 Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando la relación L/D.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 2-4 Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando la sección recta.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 2-5 Resultados de la simulación variando el ángulo de incidencia</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 2-6 Resultados de la Fa obtenido con la ecuación planteada</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 2-7 Opciones de propulsores.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 4-1 Elementos, articulaciones y los parámetros de Denavit – Hartenberg..</i>	<i>155</i>

LISTA DE ABREVIACIONES

ROV	Remotely Operated Underwater Vehicle (Vehículo submarino remotamente operado)
UUV	Unmanned Underwater Vehicle (Vehículo submarino no tripulado)
AUV	Autonomous Underwater Vehicle (Vehículo submarino autónomo)
UV's	Underwater Vehicles (Vehículo submarino)
CFD	Computer dynamics computational (Dinámica de fluidos computacional)
CAD	Computer Aided Design (Diseño asistido por computador)
CAE	Computer Aided Engineering (Ingeniería asistido por computador)
Payload	Carga útil o espacio útil para carga
Hovering	Mantenerse suspendido en una posición (flotar)

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_L	esfuerzos longitudinales
σ_T	esfuerzos transversales
P_t	Presión de trabajo
R_c	Radio del cilindro
t	espesor del cilindro
L/D	Relación Longitud / Diámetro del casco de un UV
F_a	Fuerza de arrastre
C_d	Coeficiente de arrastre
A_p	Área transversal del cuerpo de acuerdo al ángulo de incidencia
ρ	Densidad del fluido
v^2	Velocidad del fluido al cuadrado
$K_{arrastre}$	Constante de arrastre
θ_i	Es el ángulo de la articulación del eje x_{i-1} al eje x_i respecto del eje z_{i-1}
d_i	Es la distancia desde el origen del sistema de coordenadas $(i - 1) - \text{ésimo}$ hasta la intersección del eje z_{i-1} al eje x_i respecto del eje z_{i-1} .
a_i	Es la distancia de separación desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema $i - \text{ésimo}$ a lo largo del eje x_i (o distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i).
α_i	Es el ángulo de separación del eje z_{i-1} al eje z_i respecto del eje x_i . Para esta investigación se han considerado
${}^{i-1}A_i$	Matriz de transformación
n	Vector normal al AUV de las componentes de las matrices de transformación
s	Vector de desplazamiento del AUV de las componentes de las matrices de transformación
a	Vector de aproximación de las componentes de las matrices de transformación
p	Vector de posición del AUV de las componentes de las matrices de transformación
ψ	Angulo que describe orientación alrededor del eje Z

θ	Angulo que describe orientación alrededor del eje Y
ϕ	Angulo que describe orientación alrededor del eje X
L	Función lagrangiana
K	Energía cinética
P	Energía potencial
q_i	Coordenada generalizada del AUV
\dot{q}_i	primer derivada con respecto al tiempo de la coordenada generalizada q_i
τ_i	Fuerza generalizada aplicada al sistema en la articulación i , para mover el elemento i
${}^i r_i$	
${}^0 r_i$	Vector de posición con respecto al sistema de coordenadas de la base
Q_i	Matriz para determinar la velocidad en las articulaciones
v_i	Velocidad del eslabón i respecto al sistema de coordenadas de la base
U_{ij}	
U_{ip}	Matriz de velocidades de cambio de los puntos (${}^i r_i$) sobre el elemento i
\dot{q}_j	
D_{ik}	Matriz de inercia relacionada con la aceleración
$h(q, \dot{q})$	Vector de fuerza de Coriolis y centrifuga no lineal
$c(q)$	Vector de fuerza de la carga gravitatoria

Introducción, Objetivos y estructura de la tesis

Introducción, Objetivos y estructura de la tesis

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de la investigación y gestión de las aguas marinas y continentales, debe estar enfocado en el desarrollo de nuevas tecnologías técnicas y dispositivos, que propendan por un cuidado y aprovechamiento de los recurso naturales de forma equilibrada, para no perjudicar el medio ambiente.

La presente tesis está enmarcada en los alcances del proyecto DIVI-SAMOS, el cual contempló la fabricación de un vehículo autónomo implementando técnicas de diseño asistido por computador, simulación y análisis CFD y procesos de fabricación, con materiales compuestos; por otra parte, en otra investigación se desarrollaron las actividades de aplicación y aprovechamiento, de sensorización y control inspiradas neurológicamente, para dotar de autonomía a vehículos submarinos.

La presente tesis generó aportes en el diseño y construcción de un vehículo autónomo, implementado condiciones óptimas de operación, con la combinación del funcionamiento de un Vehículo Operado a Distancia (ROV, por sus siglas en inglés) y un Vehículo Submarino Autónomo (AUV, por sus siglas en inglés) tipo torpedo, además contribuyendo en las experiencias del Instituto de Diseño y Fabricación IDF, ya que con este proyecto y este vehículo se está incursionando en la robótica submarina.

El análisis hidrodinámico del vehículo construido, trajo aportes que se agregaron al modelado matemático, implementando el diseño de una herramienta de simulación y análisis del efecto de la fuerza generada por una corriente de agua, sobre el casco del vehículo, todo esto en tiempo real, lo que conduce a la reducción del costo computacional que conllevan las simulaciones CFD, además si se tiene en cuenta que varios de los modelos matemáticos actuales toman la fuerza hidrodinámica como una constate.

OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo general de esta tesis es disponer de un vehículo submarino que cuente con características de diseño que permitan equiparlo, con diferentes sensores e instrumentación, además que tenga la capacidad de realizar múltiples misiones. Para alcanzar el objetivo general se llevarán a cabo los siguientes objetivos específicos:

Realizar la búsqueda y análisis de resultados de proyectos de investigación, que preceden a éste, lo anterior con el fin de plantear propuestas de diseño e hipótesis de posibles misiones, avaladas en el estado del arte de la robótica submarina; adicionalmente, analizar la metodología usada en modelo matemático de los proyectos consultados.

Establecer parámetros de diseño para un AUV versátil, analizando las diferentes misiones en las que se emplean vehículos de este tipo. Debe encontrarse una relación que dé respuesta las necesidades de una

misión respecto a la forma. Entre otros se harán análisis: fluodinámico y de presión hidrostática, con estos análisis se buscará validar una propuesta de diseño.

Modelar Dinámica y Cinemáticamente el AUV, dentro de las posibilidades se buscará una metodología que facilite el modelado matemático, uno de los métodos más efectivos es el implementado en los brazos robot, este será adaptado para lo que se requiere el AUV. Como valor agregado, se implementarán las condiciones necesarias para hacer un estudio de la fuerza generada por las corrientes marinas, sobre el casco del vehículo.

Fabricar el AUV involucrando la selección de un material que permita construir una forma hidrodinámicamente eficiente, esto implica la implementación de materiales compuestos, en función de esto se aplicarán técnicas CAD/CAM, que enriquecerán estas labores.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

El contenido de esta tesis se encuentra distribuido en seis capítulos en donde se desarrollarán los objetivos mencionados.

Inicialmente en capítulo, “*Introducción, Objetivos y estructura de la tesis*”, se presenta una breve introducción a la investigación desarrollada en esta tesis, posteriormente se exponen los objetivos que se propusieron y se alcanzaron en este trabajo de investigación.

En el capítulo 1 “*Estado del arte*”, se hace un minucioso recuento de las particularidades presentadas en la investigación del ámbito de la robótica submarina, analizando y eligiendo las características más relevantes de las investigaciones previas.

Posteriormente, en el capítulo 2 “*Diseño mecánico del AUV*”, tomando como base los resultados obtenidos en el capítulo 1, se plantean y analizan propuestas de diseño para el AUV desarrollado en esta tesis,

la validación del diseño seleccionado se hará implementando herramientas de Ingeniería Asistida por Computador (*CAE, por sus siglas en inglés*).

La manufactura del AUV, fue descrita en el capítulo 3. “*Fabricación del AUV*” en este capítulo se desarrollaron diferentes actividades, todas dirigidas a la elección del proceso y los materiales que permitieron la fabricación de las formas propuestas en el diseño del capítulo 2.

En el capítulo 4. “Modelado dinámico cinemático” se planteó un modelo matemático híbrido que utiliza matrices de transformación para plantear la cinemática del AUV, adicionalmente con este modelo se desarrolló un análisis de la fuerza hidrodinámica, debida a la interacción del AUV con una corriente marina..

Después en el capítulo 5. “Resultados, participación en eventos científicos y publicaciones en revistas científicas”, se muestran los resultados que permitieron la participación en eventos científicos la publicación de artículos en revistas especializadas.

Las conclusiones alcanzadas con los resultados obtenidos, se presentan en el capítulo 6. “Conclusiones, aportaciones principales y líneas de futuras investigaciones”, el desarrollo de esta tesis contribuyó en los campos tratados en cada uno de los capítulos mencionados anteriormente, además quedan líneas de investigación planteadas, donde se puede profundizar y conseguir otros resultados.

Capítulo 1

Estado del arte

1 Estado del arte

1.1 LA ROBÓTICA EN LA INVESTIGACIÓN SUBMARINA

Con el fin de evaluar la situación actual de la robótica submarina, se realizó una búsqueda de los vehículos submarinos UV's (*por sus siglas en inglés Underwater Vehicles*) existentes, para tenerlos como punto de partida en esta tesis. Se obtuvieron datos de 14 países de los cuales se contó con información de 67 grupos entre universidades, empresas e institutos de investigación. Se consolidó una base de datos donde interactúan 20 parámetros, de aquí se extrajeron 40 vehículos todos AUV con los que se hizo un estudio de los parámetros concernientes al diseño, entre otros se tienen:

- Forma
- Profundidad de operación
- Velocidad máxima
- Tipo de vehículo
- Misiones que realiza
- Material de fabricación
- Tamaño

Los requerimientos que plantean las investigaciones y actividades industriales en medios acuáticos, han hecho necesaria la incorporación de diferentes mecanismos, que permitan expandir los alcances de los proyectos de investigación en esta área; estas condiciones son el espacio propicio para la implementación de la robótica submarina, convirtiéndose esta en una herramienta fundamental, pues permite realizar actividades imposibles para el ser humano [1].

Las diferentes aplicaciones y sus correspondientes características han generado múltiples clasificaciones de los UV's, una de estas se debe a la forma de operación teniendo entonces los ROV, los AUV y los UUV.

- Los ROV (*por sus siglas en inglés Remotely Operated Underwater Vehicle*) es un vehículo operado remotamente, con la particularidad de mantener un enlace permanente, por medio de un cable que transmite señales llamado “umbilical”, no requieren de tripulación, pero si de un operador, son usados comúnmente en la industrial de los hidrocarburos.
- UUV (*por sus siglas en inglés Unmanned Underwater Vehicle*) Tiene la capacidad de realizar misiones parcialmente programadas, requieren cierto nivel de comunicación durante el desempeño de misiones, permitiendo a diferencia de los ROV estar desconectados parcialmente, pero también necesitan de un operador que supervise la ejecución de las misiones.
- AUV (*por sus siglas en inglés Autonomous Underwater Vehicle*) son Vehículos autónomos Sumergibles, dicha autonomía hace referencia a la posibilidad de ejecutar misiones sin necesidad de una conexión física con el operador. Tiene la capacidad de ser autoguiados y autopulsados, las misiones son programadas y el vehículo tiene autonomía para “tomar decisiones” que le permiten llevar la a cabo la misión.

Teniendo en cuenta la clasificación anterior y las características presentadas por cada uno de los vehículos mencionados, cabe anotar que los AUV presentan mayor versatilidad al no necesitar una conexión permanente, permitiendo esto que se ejecuten diferentes tipos de misiones, por esta razón se considera que es la opción más adecuada en cuanto a la clasificación por tipo de operación.

Los AUV's se pueden considerar uno de los robots submarinos con mayor versatilidad, son controlados por un ordenador a bordo del mismo vehículo, además alcanzan profundidades de operación hasta de 6.000 metros, cuentan con sistemas de energía y propulsión propios.

En industrias como la petrolera y de gas, son ampliamente utilizados debido a que reducen riesgos y costos en actividades de inspección y muestreo submarino. Por otra parte, industrias como la de las telecomunicaciones con redes de conexión transoceánica también implementan AUV.

En el ámbito de la investigación tanto del sector gubernamental como del privado, los AUV se usan en misiones de seguridad (vigilancia), mapeo del lecho submarino entre otras.

En el proyecto *The Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*; plantea avances importantes en la evolución de los AUV. En la década de los 60, con la necesidad de recoger información del lecho submarino, se fabrican los primeros AUV's [2].

En los años 70's, los primeros centros de investigación y entre otras la universidad de Washington APL desarrolla el AUV llamado UARS y el SPURV para recolectar información de las regiones Árticas. Por otra parte, el Instituto de Sistemas Autónomos Submarinos de la Universidad de New Hampshire con participación de la Naval de los Estados Unidos fabrica el EAVE.

Para la década de los 80's se desarrolla el primer simposio internacional de Tecnología Sumergible sin enlazar, por otra parte, hubo grandes avances en tecnología que permitieron la implementación de ordenadores.

La década de los 90 trajo consigo el desarrollo que pasó de conceptos de prueba a la primera generación de vehículos para completar tareas definidas y la comercialización de los mismos.

Para el año 2000 y hasta la actualidad el crecimiento comercial de los AUV, es más representativo debido a la implementación de estos vehículos en diferentes actividades industriales, trascendiendo entonces de las áreas académicas y de investigación a las comerciales

Este continuo crecimiento, ha llevado al surgimiento de concursos para el desarrollo de robótica submarina, como lo es la AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International) que anualmente, entrega alrededor de \$100,000 USD. Participan cerca de 200 equipos representados por más de 2000 estudiantes de todo el mundo, participan en el diseño integral de UV's.

Con este recuento histórico y analizada toda la información encontrada, se consideraron tres aspectos a saber: especificaciones funcionales de los AUV, los AUV y sus misiones, por ultimo propuestas de diseño; estos temas se amplían a continuación.

1.2 LOS AUV Y SUS MISIONES

Se puede definir una misión como lo que se pretende hacer con el AUV, con eso se tendría que una de las características que mejor clasifica los AUV, son las misiones que pueden realizar, se presentan necesidades tan específicas que para otras misiones pueden ser inconvenien-

tes. Teniendo en cuenta las similitudes presentadas en algunas aplicaciones se distinguen 3 grandes grupos: Investigación científica, Actividades comerciales y Actividades militares

- **Investigación científica**

Es el área de uso de los AUV en donde más retos se presentan dado que siempre se quiere incursionar en ambientes desconocidos, entre algunas de las misiones ejecutadas en el campo de la investigación científica se encuentran:

- Muestreo de aguas y sedimentos
- Monitoreo medioambiental
- Muestreo de especies marinas
- Mapeo de fondos marinos
- Búsqueda y vigilancia de pecios
- Fotografía y video-grabación
- Mapeo de glaciares
- Muestreo de icebergs

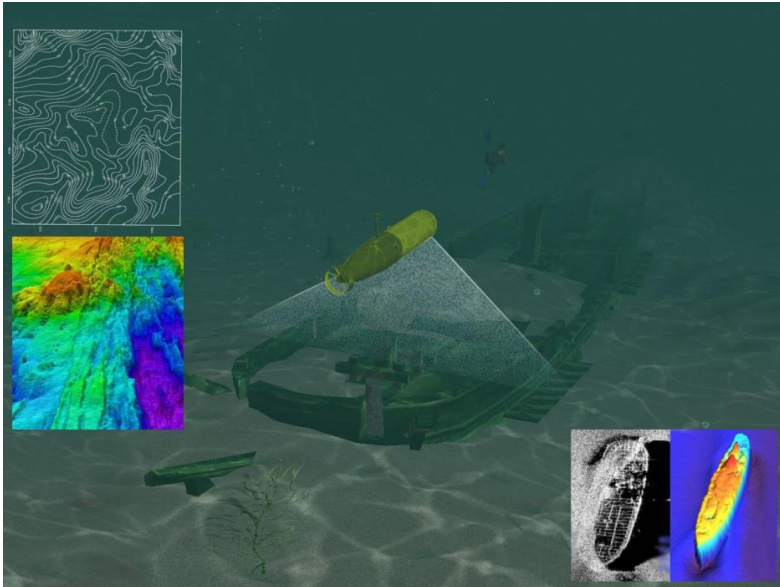


Figura 1-1 Búsqueda y vigilancia de pecios

Fuente: NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

- **Actividades comerciales:**

La incursión de la industria en el ambiente submarino ha hecho necesaria la implementación de actividades específicas, para cada una de esas industrias, los AUV han sido modificados paulatinamente para poder cubrir ese abanico de necesidades, entre otras se tiene:

- Inspecciones de tuberías y cableado submarino (eléctrico y de comunicaciones) *Figura 1-2*
- Evaluación hidrográfica y planeación de tendido de cables
- Inspección de estructuras civiles sumergidas
- Verificación de anclaje de embarcaciones
- Operaciones de pesca
- Localizar sectores ideales para pesca
- Preparación fílmica de documentales para cine y televisión. *Figura 1-3*
- Soporte logístico para realizar construcciones submarinas
- Evaluación hidrográfica y planeación de tendido de tuberías sumergidas
- Reparación de estructuras sumergidas
- Inspección de redes de pesca *Figura 1-3 Figura 1-4*
- Inspección del estado de la parte sumergida de embarcaciones

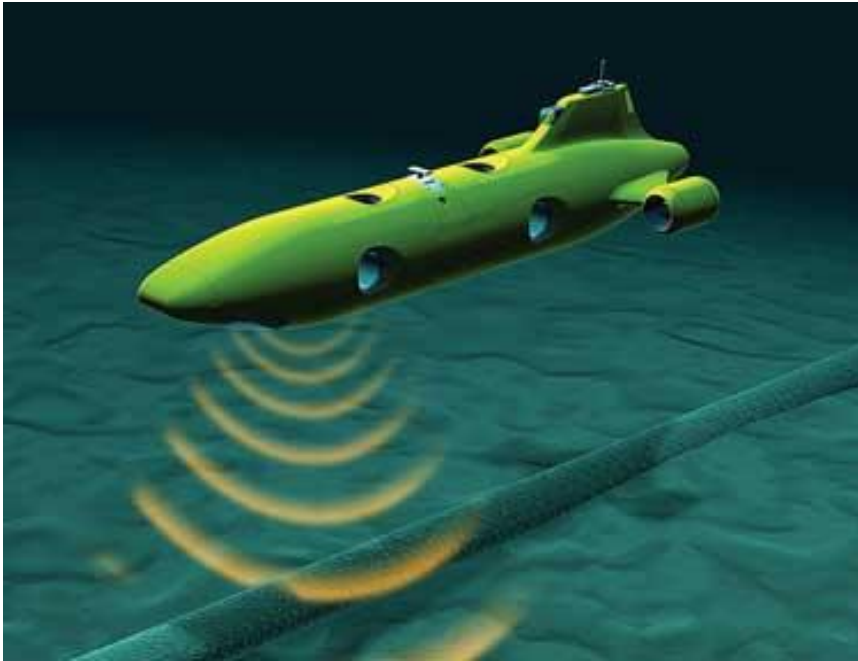


Figura 1-2 Inspección de tuberías y cables submarinos

Fuente: PRAESSENTIS S.L.



Figura 1-3 Filmación de documentales para cine y televisión

Fuente: PRAESSENTIS S.L.

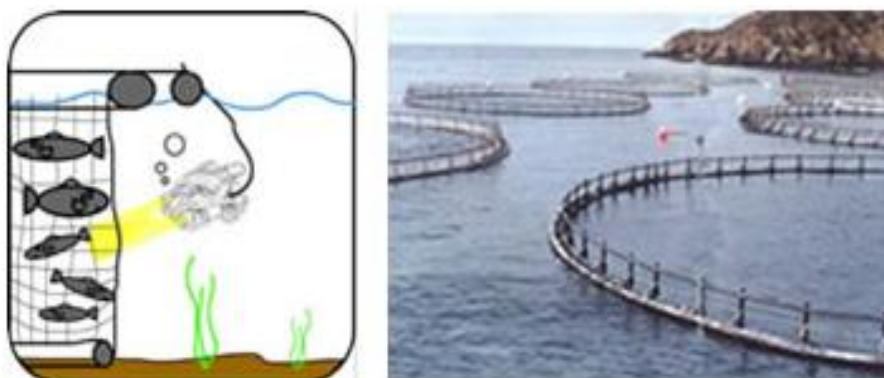


Figura 1-4 Inspección de redes de pesca

Fuente: PRAESSENTIS S.L.

- **Actividades militares:**

Los resultados obtenidos en las misiones militares en las que se han implementado AUV's, han permitido que se garantice recursos públicos para mantener y mejorar los vehículos existentes. La capacidad de ser vehículos no tripulados es una de sus mayores ventajas, pues llegan a disminuir el riesgo humano hasta en un 100%. Algunas de las actividades militares donde se han asegurado un lugar los AUV's son:

- Preparación y ejecución de actividades de rescate y salvamento
- Mapeo de campos de escombros
- Actividades de seguridad y protección de instalaciones costeras y submarinas
- Rastreo de minas *Figura 1-5*
- Rastreo de naves



Figura 1-5 Rastreo de minas

Fuente: teledynegavia

1.3 ESPECIFICACIONES FUNCIONALES DE LOS AUV

Con las diversas misiones que pueden desarrollar los AUV's y las características específicas que se requieren en cada caso, a continuación, se detallarán las tecnologías que comparten los AUV's, siendo entonces estos aspectos los más comunes: autonomía, sistemas de navegación y sensores y sistemas de comunicación.

- **Autonomía energética:**

La autonomía energética es un parámetro que restringe las misiones en términos de duración en el tiempo. En lo que a sistemas de energía respecta, se investiga sobre la relación entre duración y tamaño del sistema, es importante tener sistemas de alimentación energéticos pequeños que brinden gran número de horas de trabajo, que se traducen en alta autonomía, cumplir con esto permite destinar espacio para sistemas que contribuyan directamente en los objetivos de las misiones, principalmente sistemas de toma de muestreo o datos.

Entre las tecnologías usadas en las baterías de los AUV se pueden mencionar las de Níquel, Litio y Zinc, siendo éste último el más costoso. Por otra parte, se ha incursionado en el uso de energías alternativas, para este caso la energía solar. El AUSI (Autonomous Undersea Systems Institute) utiliza paneles solares para recargar las baterías desde la superficie tal como se ve en la *Figura 1-6*.

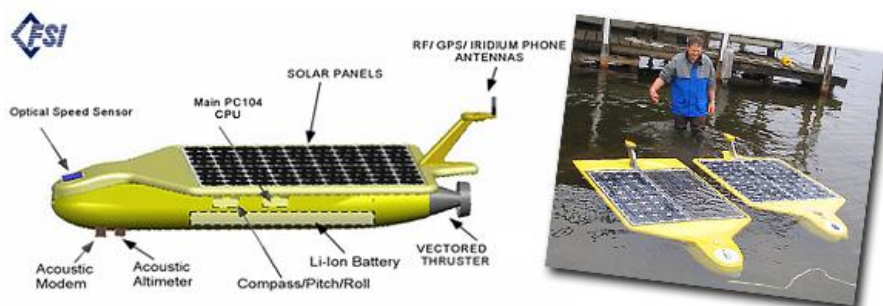


Figura 1-6 AUV con sistema de energía solar
Fuente: AUSI (Autonomous Undersea Systems Institute)

- **Sistemas de Navegación:**

Al ser vehículos no tripulados, se puede considerar que, con los AUV, en la mayoría de los casos se realiza una navegación a ciegas, dado que, aunque cuentan con cámaras no hay una transmisión de imágenes o información en tiempo real, los sistemas acústicos con los cuentan estos vehículos evitan posibles choques bien sea contra obstáculos o el mismo fondo del mar, a esta habilidad se le conoce como “situational awareness”.

En la actualidad se han incorporado sistemas de navegación inercial que además son combinados con el uso de sonar que ofrecen más precisión y rapidez, estas tecnologías aún son muy costosas. Otra técnica incorporada a la navegación de los AUV's es la basada en GPS, esta

técnica se implementó hace relativamente poco, lo cual permite posicionar al vehículo además del control de su trayectoria. El principal inconveniente está en que periódicamente es necesario que AUV esté en la superficie para actualizar datos de posición, otra de las técnicas utilizadas es la de combinar sensores acústicos con el control de trayectoria por GPS.

- **Sistemas de comunicación y Sensores:**

Con la incursión de la robótica en la investigación submarina, se generó todo un universo de necesidades, debido al cambio de condiciones ambientales, los sensores existentes usados en ambientes aéreos y terrestres no están sometidos a las exigentes condiciones que se presentan en las profundidades submarinas tales como: corrosión, bajas temperaturas, altas presiones hidrostáticas, baja visibilidad y la necesidad estanqueidad.

Empresas de electrónica dedicadas al diseño de sensores, han enfocado sus esfuerzos en esta nueva gama de sensores sumergibles, algunos de los parámetros más relevantes son:

- Versatilidad
- Rapidez de operación
- Bajo consumo energético
- Reducción del tamaño

El término LENS “Longer and Longer Ranges”, engloba los sensores que permiten una alta resolución en un largo rango, es una característica que se puede ver en varios de los productos ofrecidos actualmente.

Los sistemas de comunicación que funcionan con ondas electromagnéticas no trabajan bajo el agua, en un medio acuático la comunicación acústica es probablemente la más viable, algunas investigaciones han evaluado otros medios de comunicación, como las basadas en laser a baja frecuencia que son más limpias y robustas, frente a ruido o perturbaciones externas. Actualmente se encuentran sistemas acústicos con

comunicación basada en radiofrecuencia. En los últimos años se ha llegado hasta rangos de kM/s (kilomuestras por segundo) a pocos Kbps, a pesar de que este aspecto de los AUV's sigue en constante mejora e investigación. [3]

- **Aspectos funcionales de diseño:**

Las características del diseño de cada AUV están directamente relacionadas con las misiones que realizará el vehículo, dependiendo de las misiones se requieren diferentes formas de casco, profundidad máxima de operación, velocidad máxima de operación, material de fabricación. Los valores típicos para estos parámetros se presentan a continuación.

Profundidad máxima de operación: Existe una relación directa entre la presión hidrostática y la profundidad de operación, a mayor profundidad mayor presión, esto interfiere directamente con los materiales y las formas de los AUV. Los rangos más típicos.

- 0-100 m
- 100-500 m
- 500-1000 m
- 1.000-6.000 m

Velocidad: La velocidad máxima alcanzada por un AUV, depende de varios factores a saber: sistema de propulsión, forma y tamaño del casco. La velocidad es determinante en las misiones, mientras que en misiones de vigilancia se requiere reacción rápida y alta velocidad, en misiones de mapeo no se necesita alcanzar mucha velocidad.

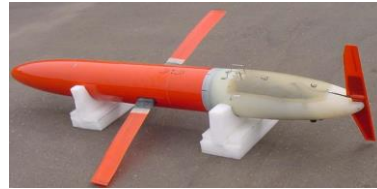
Forma: Otro aspecto característico en los AUV es la de forma, ya que existen varios tipos de estas y es necesario conocerlas para determinar aspectos importantes como lo puede ser su velocidad, por la fluodinámica o bien su material de fabricación.

FORMAS MAS REPRESENTATIVAS

Torpedo



Torpedo con alas



Estructura abierta



Biomimetizado



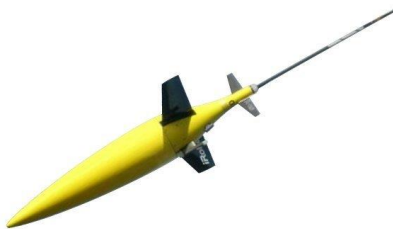
Rectangular



Ovalado



Lagrima



Ala delta

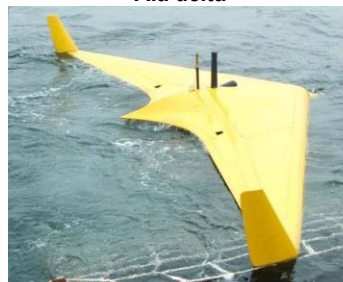


Tabla 1-1 Formas representativas

Tamaño: El tamaño de un AUV depende directamente de la cantidad de dispositivos instalados y los dispositivos a su vez dependen de las necesidades de las misiones. Con los avances tecnológicos los dispositivos se reducen cada vez más. Cabe anotar que un tamaño mayor del casco del AUV, puede permitir un espacio de carga útil mayor, esto repercute en la versatilidad del AUV.

Material de fabricación: Para determinar el material adecuado se debe tener en cuenta la profundidad de operación, forma y tamaño, encontrar el equilibrio entre estas características permitirá tener un AUV, que se ajuste a las necesidades, algunos de los materiales usados son:

- Aluminio
- Fibra de carbono
- Fibra de vidrio
- ABS

1.4 ALGUNOS DE LOS AUV EXISTENTES

Actualmente hay un gran número de investigadores que desarrollan tecnología en el campo de la robótica submarina y más específicamente en el área de los AUV's tanto a nivel nacional como mundial.

Como se mencionó en el numeral anterior los AUV, se pueden clasificar según el campo en que se usan, a nivel mundial existen diferentes centros de investigación submarina, donde se implementan los AUV en los siguientes numerales se hará un recuento de los vehículos más representativos en los diferentes campos de acción.

AUV's de vehículos españoles

La ubicación geográfica de España es propicia para la investigación submarina, gracias a la gran porción de costa que tiene, en la *Tabla 1-2* se presentan los AUV's más representativos y sus respectivos centros de investigación.

AUV's ESPAÑOLES			
Centro De Investigación	Investigadores	Proyecto	Web
Universidad de Girona Girona, Cataluña Computer Vision and Robotics Group	Rafael García, Pere Ridao	VICOROV	http://vicorob.udg.edu/
Universidad Politécnica de Cataluña OBSEA	Enric Plaza Cervera	OBSEA	http://www.upc.edu/cdsarti/OBSEA/info/features/feat_eng.html#structure
CSIC	Jaume Piera, Manuel Armada	ANERIS	http://www2.iia.csic.es/Projects/aneris/
Universidad Illes Balears Systems, Robotics and Vision Group	Gabriel Oliver, Antoni Burguera	RAO	http://dmi.uib.es/research/SRV/rsc_en.htm
Universidad de Girona, UPC, Universidad Barcelona		AIRSUB	http://eia.udg.es/~pere/airsub/descargas/presentaciones/Martech05Presentaci%C3%B3n
UPM-DISAM Madrid Ocean Engineering Society	Roque Saltarén	Ocean Engineering Society	http://www.disam.upm.es/~iee_oes/
Universidad De Cádiz Grupo Oceanografía Física	Bruno Mejías, Miguel	Datawell	http://www.uca.es/grupos-inv/RNM205/equipamiento

Tabla 1-2 AUV's Españoles

El AIRSUB de la Tabla 1-2 es usado en aplicaciones Industriales de Robots Submarinos. Dicho proyecto se desarrolla totalmente en España con la participación de UPC (Universitat Politècnica de Catalunya), U de G (Universitat de Girona) y UIB (Universitat de les Illes Balears), además de la ayuda del Ministerio de Educación y Ciencia.

AUV's Internacionales

A continuación, se presenta un breve recuento del número de vehículos analizados por país:

- Alemania 2
- Australia 5
- Canadá 6
- Dinamarca 2
- Francia 3
- Islandia 1
- Italia 1
- Noruega 1
- Portugal 2
- Reino unido 6
- Rusia 1
- Suecia 1
- USA 25

PAÍS	INSTITUTO / EMPRESA	PAÍS	INSTITUTO / EMPRESA
Australia	Australian Nat. Uni.	Norway	NUI
	CSIRO	Portugal	DSOR
	DSTO		Uni. of Porto
	Uni. of Sydney	Russia	Russian Acad. of Sci.
	Uni. of Western Australia	Sweden	Uppsala Uni.
Canada	Hylands UVs		AUSI
	ISER		Bluefin
	Uni. of Newfoundland		C&C Technologies
	NRC of Canada		Cornell Uni.
	Uni. du Québec		Duke Uni.
Denmark	Simon Fraser Uni.		Uni. of Florida
	TU of Denmark		Florida Atlantic Uni.
France	MARIDAN		Florida Institute of Tech. (FIT)
	Cybernetics		Harbor Branch Oceanogr. Inst.
	ECA		Uni. of Hawaii
Germany	IFREMER		Hydroid
	Alfred-Wegner Inst.	U.S.A.	KIPR
Iceland	STN Atlas Elektronik		Uni. of Louisiana
Italy	Hafmynd Ltd.		MIT
Japan	CNR-IAN		Monterey Bay Aquarium RI
	JAMSTEC		Naval Oceanogr. Office
	KDD		Naval Postgrad. Sc.
	Tokai Uni.		Princeton Uni.
U.K.	Uni. of Tokyo		Sias/Patterson
	Aberdeen Uni.		Uni. of South Florida
	Cranfield Uni.		Stanford Uni.
	Heriot-Watt Uni.		Texas AMU Uni.
	Uni. of Plymouth		Uni. of Washington
	Southampton Oceanogr. Centre		Virginia Tech
	Uni. of Southampton		Woods Hole Oceanogr. Inst.

Tabla 1-3 Institutos y Universidades que desarrollan AUV

Fuente: www.transit-port.net/Lists/AUVs.html

1.5 CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Con la información encontrada y basado en el estudio que se realizó a la misma, se aprovechará este análisis para determinar los principales parámetros de diseño, teniendo en cuenta los requerimientos específicos del proyecto DIVISAMOS.

En este apartado se presenta la muestra de 40 UV's de los cuales se tomaron datos relevantes, se organizaron en la *Tabla 1-4* con las características de cada uno de ellos, con esta tabla se realizó un análisis cuantitativo, cualitativo y de comparación de parámetros, para obtener finalmente una serie de gráficos con los que se muestra con mayor claridad la tendencia de los UV's operados en diferentes misiones, para concluir finalmente con la consolidación de los parámetros de diseño ideales frente a los modelos existentes.

Para la tabulación se seleccionaron algunas características, que la postre entregarán los parámetros de diseño del AUV del proyecto DIVISAMOS. Los parámetros analizados son los siguientes:

- | | |
|--------------------|---------------|
| ○ Nombre | ○ Misión |
| ○ Tipo de vehículo | ○ Profundidad |
| ○ Forma | ○ Material |
| ○ Tamaño | ○ Velocidad |

Nombre	Forma	Prof.	Vel. m/s	Tipo	Misiones	Material	∇m^3
ALBAC	Torpedo alas	300	1.03	AUV	Múltiples	Aluminio	0.57
Alistar 3000	Lágrima	3000	1.03	AUV	Comercial	Aluminio	12.1
Alister REA	Torpedo	300	4.12	AUV	Militar	Aluminio	2.35
Aqua Box II	Ovalada	50	1.00	AUV	Investigación	F. vidrio	0.86
Aqua Explorer 2	Torpedo	2000	2.80	AUV	Comercial	F. vidrio	3.51
Aqua Jelly	Biomimetizado	20	0.30	AUV	Comercial	Aluminio	0.02
Aqua Penguin	Biomimetizado	50	2.70	AUV	Comercial	F. vidrio	0.10
Autosub 6000	Torpedo	6000	2.00	AUV	Múltiples	Aluminio	4.46
Autosub 1600	Torpedo	1600	2.00	AUV	Múltiples	Aluminio	5.67
AUV-Gilder	Abierto	4000	0.98	AUV	Investigación	Aluminio	1.78
Bionik Manta	Biomimetizado	100	2.78	AUV	Comercial	Aluminio	2.63
Bleeper Sport	Ovalada	50	0.70	ROV	Comercial	ABS	0.04
Bluefin-12	Torpedo	200	2.57	AUV	Militar	Aluminio	3.76
Bluefin-9	Torpedo	200	2.06	AUV	Investigación	Aluminio	0.10
Charybdis	Platillo	20	0.70	AUV	Investigación	ABS	0.91
Fetch 2	Lágrima	150	6.50	UUV	Militar	F. vidrio	0.16
Gavia	Torpedo	1000	3.00	AUV	Múltiples	Aluminio	0.11
H300 MKII	Abierto	300	0.51	ROV	Comercial	Aluminio	0.25
Hammerhead	Torpedo	100	2.50	AUV	Múltiples	Aluminio	0.27
Infante	Rectangular	500	2.50	AUV	Investigación	F. vidrio	5.13
LAUV	Torpedo	50	2.50	AUV	Múltiples	Aluminio	0.03
Liberade	Ala Delta	100	0.80	AUV	Militar	F. carbono	0.71
Mako	Abierto	50	2.10	AUV	Investigación	Aluminio	0.17
Manta	Ovalada	800	5.14	AUV	Militar	F. carbono	22.9
Maya	Torpedo	200	2.30	AUV	Múltiples	Aluminio	0.09
Morpheus	Rectangular	200	2.57	AUV	Múltiples	F. carbono	0.09
Odyssey I	Lágrima	6000	2.00	AUV	Investigación	F. carbono	0.75
Ranger	Torpedo	50	2.30	UUV	Militar	ABS	0.01
REMUS 100	Torpedo	100	2.60	AUV	Múltiples	Aluminio	0.06
SAUV II	Torpedo alas	500	1.54	AUV	Múltiples	F. vidrio	1.27
Sea Squirt	Torpedo	200	1.54	AUV	Investigación	ABS	0.07
Seaglider	Lágrima	1000	3.20	UUV	Múltiples	F. vidrio	1.32
SeaOatier MK II	Ovalada	600	2.30	AUV	Investigación	F. vidrio	1.62
Serafina	Torpedo	20	1.00	AUV	Múltiples	Aluminio	0.01
SPRAY	Torpedo alas	1500	0.26	AUV	Múltiples	Aluminio	0.08
SQX 1	Doble Torpedo	500	3.00	UUV	Investigación	Aluminio	0.34
Taipan 2	Torpedo	100	1.80	AUV	Múltiples	Aluminio	0.07
Tuna-Sand	Abierto	1500	1.29	AUV	Investigación	F. carbono	1.10
Virginia Tech	Torpedo	100	2.30	AUV	Investigación	Aluminio	0.01

Tabla 1-4 Muestra UV's para análisis

A continuación se presentarán el resultado de los análisis de la información contenida en la *Tabla 1-4*.

En la *Figura 1-7* se muestra la relación de los UV's con respecto al sistema de operación que utilizan, se puede apreciar que un 84% de los

vehículos corresponde al AUV, esto refleja la versatilidad que tiene este tipo de operación, que le permite realizar diferentes tipos de misiones.

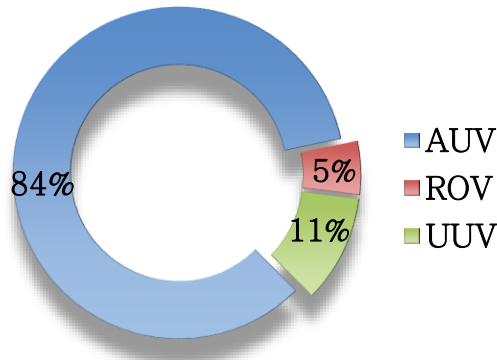


Figura 1-7 Análisis tipo de operación

Uno de los principales parámetros para diseño es el material que se va a usar, en la Figura 1-8 se presentan los datos relativos a los materiales usados en los UV's objeto de estudio, con un 55% se puede ver que el aluminio es el material que más se usa y muy seguramente el que mejores condiciones de trabajo presenta. También cabe agregar que la fibra de vidrio es el más usado de los materiales compuestos presentando un 21%.

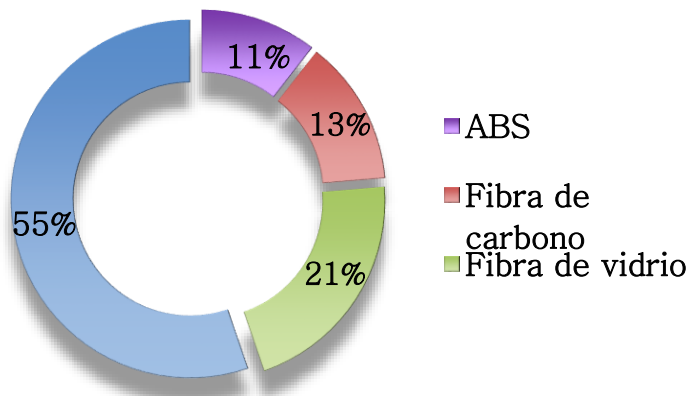


Figura 1-8 Material de fabricación del casco

El calificativo de “UV’s versátil” aplica para un vehículo que cumpla las condiciones necesarias para ejecutar un amplio abanico de misiones, uno de los parámetros determinante es la profundidad de operación, en la *Figura 1-9* se presentan los diferentes rangos de profundidad siendo el más común entre 0 y 100 metros con un 38 %, sin embargo muy de cerca con un 31% se tiene el rango entre 101 y 500 metros, se podría afirmar que el 69% de las misiones se desarrollan entre los 0 y 500 metros.

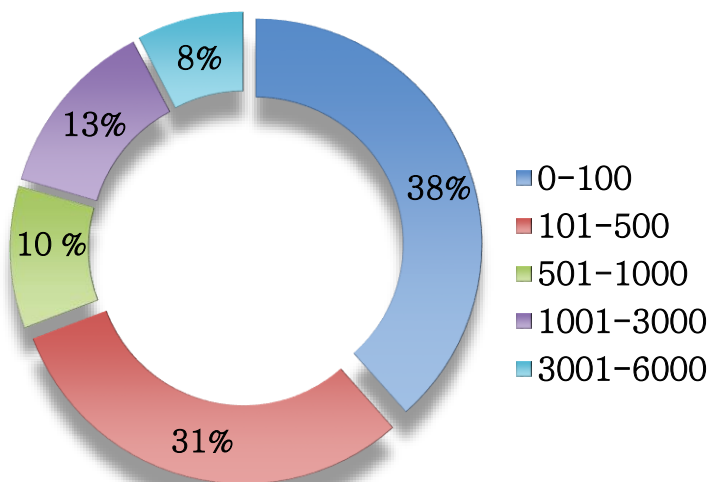


Figura 1-9 Profundidad de operación

Teniendo en cuenta los tipos de misiones que se establecieron en la *Figura 1-10* se puede apreciar que el 48% de los UV’s son utilizados en misiones de investigación.

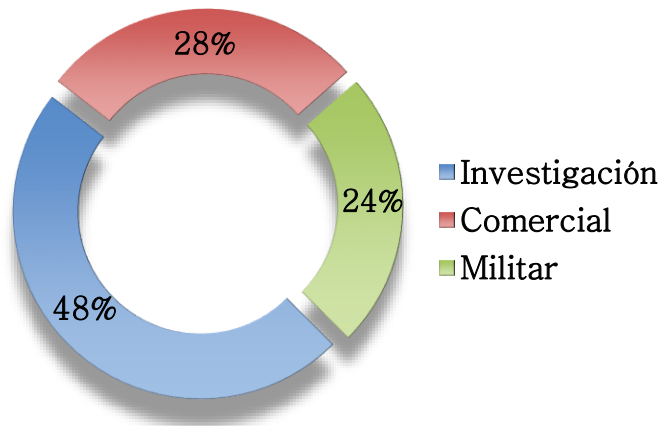


Figura 1-10 Tipo de misión

En la Figura 1-11 se pueden apreciar los rangos de velocidad y los porcentajes de vehículos en cada uno de ellos, con un 44% la velocidad más común está entre 2.1 y 3 m/s, además solo un 10% usa velocidades más altas en el desarrollo de las misiones.

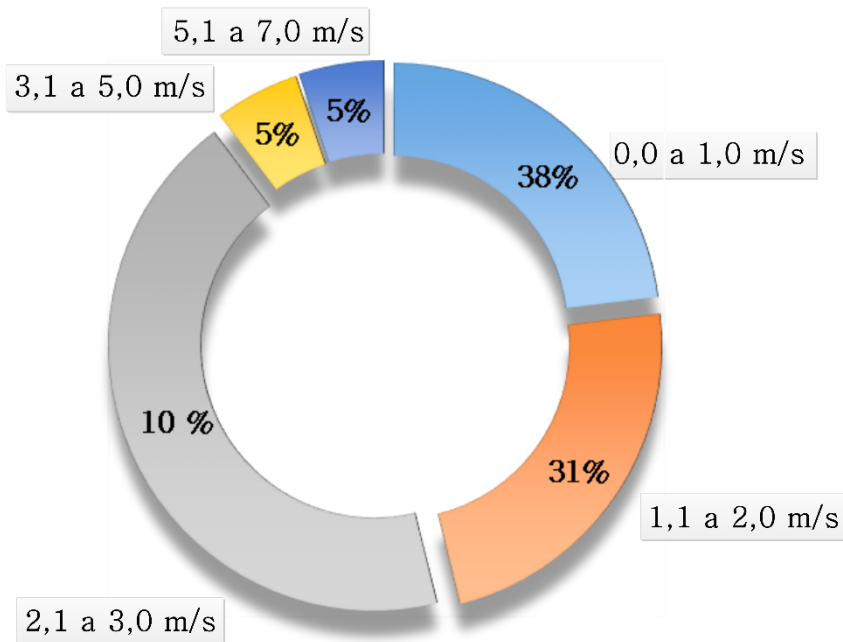


Figura 1-11 Rango de velocidad

La velocidad máxima que puede alcanzar un UV está relacionada directamente con la forma del casco, en la *Figura 1-12* se pueden apreciar la velocidad máxima alcanzada por algunas de las formas del casco más representativas, cabe resaltar que la forma de torpedo y lagrima son las que mayores velocidades alcanzan.

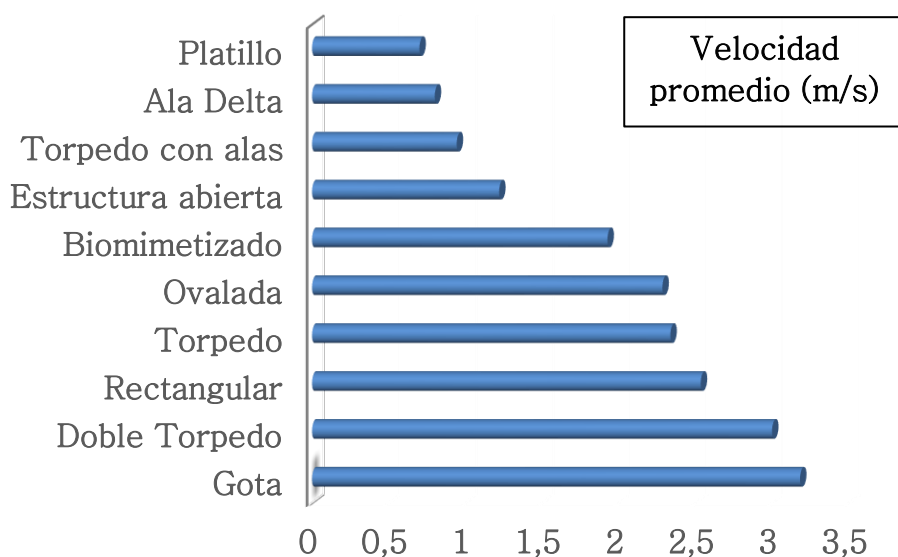


Figura 1-12 Forma - Velocidad

Ya se ha mencionado que dependiendo el tipo de misión se tienen diferentes características, una de ellas es la profundidad, adicionalmente para alcanzar inmersiones más profundas es necesario usar materiales más resistentes, en la *Figura 1-13* se presenta la relación entre los materiales y la profundidad máxima alcanzada, la fibra de carbono es implementada en las misiones de alta profundidad.

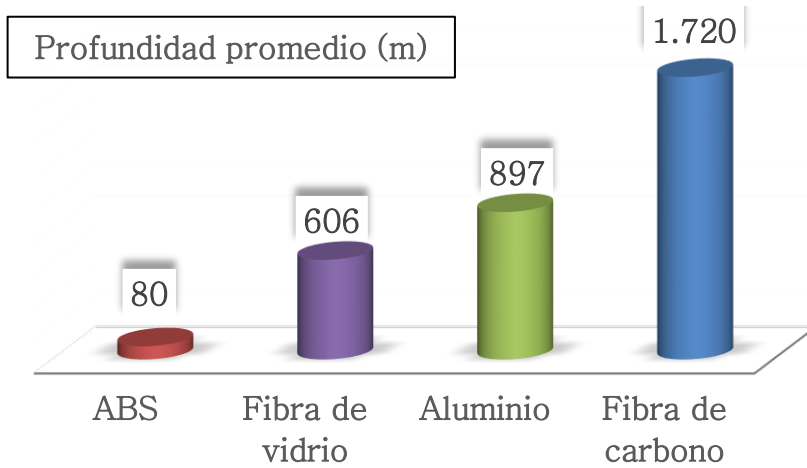


Figura 1-13 Profundidad - material

La versatilidad es un parámetro importante para un UV, en la *Figura 1-14* se muestran los resultados del análisis entre el tipo de operación y la profundidad alcanzada, el AUV al no tener una conexión física con el exterior permite alcanzar una profundidad mayor.

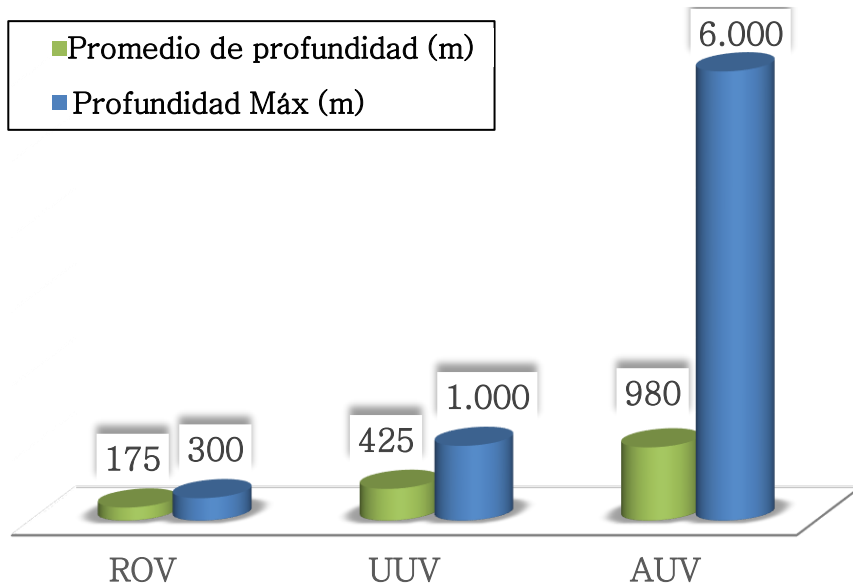


Figura 1-14 Profundidad - Tipo funcionamiento

Las formas hidrodinámicas permiten reducir la fuerza de arrastre generada por el UV en su desplazamiento, no todos los materiales permiten la fabricación de formas complejas, en la *Figura 1-15* se presentan los resultados del análisis de materiales con respecto a la velocidad promedio, la fibra de vidrio consigue la velocidad promedio más alta, esto se traduce en la versatilidad para conseguir formas hidrodinámicamente eficientes.

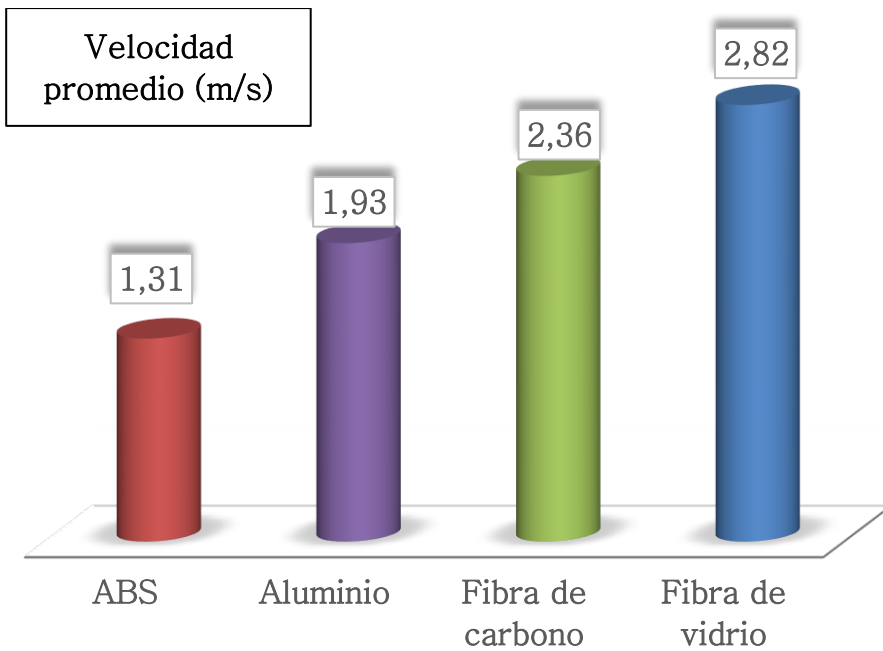


Figura 1-15 Material - Velocidad promedio

La velocidad máxima es uno de los parámetros que puede determinar el tipo de misión, en la *Figura 1-16* se evidencia, que en las misiones

relacionadas con vigilancia que están dentro de las actividades militares, son las que requieren de mayor velocidad, tal como se muestra tanto en la velocidad promedio como en la velocidad máxima alcanzada.

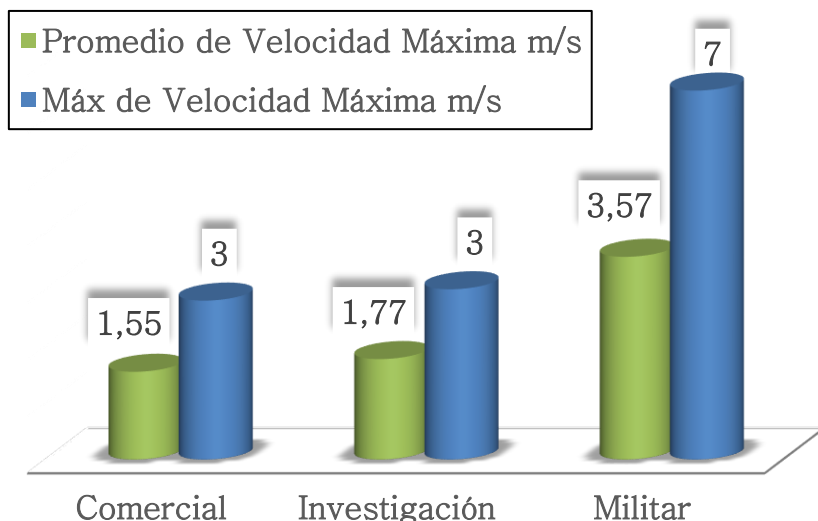


Figura 1-16 Velocidad - Misión

1.6 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DINÁMICO Y CINEMÁTICO

En la *Tabla 1-5* se hace una relación de las características de algunos de los modelos matemáticos de dicho vehículos analizados. En el recuento presentado se hizo evidente la poca importancia y el análisis tan vago que se ha hecho a la fuerza de arrastre que presentan algunos UV's; dejando de lado una de las fuerzas que más influencia tiene, según se mostrará más adelante en el análisis hidrodinámico del casco del AUV, cabe resaltar que en algunos casos no se reporta información al respecto.

Dentro de la información que se recabó se pudo ver que en ningún otro proyecto se hizo un análisis de la influencia del ángulo de ataque de una corriente marina sobre el casco del vehículo, además, para los

vehículos de casco abierto no se le da importancia a la hidrodinámica, se puede presumir que es por las bajas velocidades que alcanza.

Nombre	Forma	Modelo
ALBAC	Torpedo alas	Fuerza arrastre constante
Alistar 3000	Lágrima	Fuerza arrastre variable
Alister REA	Torpedo	Fuerza arrastre constante
Aqua Box II	Ovalada	Fuerza arrastre constante
Aqua Explorer 2	Torpedo	Fuerza arrastre constante
Aqua Jelly	Biomimetizado	No reporta
Aqua Penguin	Biomimetizado	No reporta
Autosub 1600	Torpedo	Fuerza arrastre constante
Autosub 6000	Torpedo	Fuerza arrastre constante
AUV-Gilder	Abierto	Fuerza arrastre constante
Bionik Manta	Biomimetizado	Fuerza arrastre constante
Bleper Sport	Ovalada	Fuerza arrastre constante
Bluefin-12	Torpedo	Fuerza arrastre constante
Bluefin-9	Torpedo	Fuerza arrastre constante
Charybdis	Platillo	Fuerza arrastre constante
Fetch 2	Lágrima	Fuerza arrastre variable
Gavia	Torpedo	Fuerza arrastre constante
H300 MKII	Abierto	No reporta
Hammerhead	Torpedo	Fuerza arrastre constante
Infante	Rectangular	Fuerza arrastre constante
LAUV	Torpedo	Fuerza arrastre constante
Liberade	Ala Delta	Fuerza arrastre constante
Mako	Abierto	Fuerza arrastre constante
Manta	Ovalada	Fuerza arrastre constante
Maya	Torpedo	Fuerza arrastre constante
Morpheus	Rectangular	Fuerza arrastre constante
Odyssey I	Lágrima	No reporta
Ranger	Torpedo	No reporta
REMUS 100	Torpedo	No reporta
SAUV II	Torpedo alas	Fuerza arrastre constante
Sea Squirt	Torpedo	No reporta
Seaglider	Lágrima	Fuerza arrastre variable
SeaOatter MK II	Ovalada	Fuerza arrastre constante
Serafina	Torpedo	No reporta
SPRAY	Torpedo alas	No reporta
SQX 1	Doble Torpedo	Fuerza arrastre constante
Taipan 2	Torpedo	No reporta
Tuna-Sand	Abierto	No reporta
Virginia Tech	Torpedo	No reporta

Tabla 1-5 Relación de los modelos dinámicos y cinemáticos

Capítulo 2

Diseño del AUV

2 Diseño mecánico del AUV

Tomando como punto de partida las conclusiones obtenidas en el Capítulo Estado del arte, donde se determinaron aspectos funcionales como la profundidad de operación, la velocidad máxima de operación, el material de fabricación, el tipo de funcionamiento y la forma del casco del UV; en este capítulo se procedió a plantear la propuesta de diseño que cumpla con los requerimientos del proyecto DIVISAMOS, también se llevó a cabo la validación por medio de simulaciones tanto estructurales como el análisis hidrodinámico de dicha propuesta.

Se buscará que el diseño propuesto sea versátil para que el UV una vez fabricado tenga la capacidad de realizar misiones de diferentes tipos. El análisis del estado del arte permitió optimizar la propuesta de diseño, ya que se enfoca en las características de los UV's que mejores resultados han logrado.

2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

La definición de los parámetros de diseño está enmarcada dentro las funciones que se espera que el UV del proyecto DIVISAMOS llegue a cumplir, para el alcance del proyecto que se tiene: diseñar, construir y disponer de un vehículo submarino autoguiado, que pueda ser equipado con diferentes sensores e instrumentación, para poder realizar misiones diversas, principalmente de análisis de las aguas oceánicas. Las primeras misiones oceanográficas de estudio y análisis de la calidad del agua se harán en el área del Mar Menor (Cartagena-Murcia), debido a su accesibilidad geográfica y a la profusión de estudios medioambientales realizados por grupos investigadores, implicados en el tema, también de vigilancia tanto en el ámbito civil como militar, la supervisión y vigilancia de fondos marinos, operaciones de búsqueda y rescate, inspección de estructuras sumergidas y superficies en barcos, plataformas petrolíferas, y localización e inspección de pecios.

Con las anteriores pretensiones y los resultados del estado del arte se pueden estimar los siguientes parámetros de diseño:

La profundidad de operación está en un rango entre los 0 y 100 metros, ya que es el rango en que más se realizan misiones con los UV's, esto implica la selección de materiales resistentes a la presión hidrostática de ese rango, uno de los más usados es el aluminio.

El sistema de operación más versátil es el AUV, ya que permite mayor maniobrabilidad, mayor velocidad de desplazamiento y de ser necesario mayor profundidad de operación, por estas razones el AUV es el tipo de vehículo seleccionado.

Se requiere proponer y validar una forma que sea hidrodinámica para que presente menor resistencia al avance; el material que mostró las mejores formas es la fibra de vidrio; entre las misiones se contemplan

actividades de vigilancia, se conoce que las velocidades promedio están en 2 m/s.

2.2 DISEÑO DEL CASCO

El casco del AUV está sometido al ambiente corrosivo del mar, además es la parte que está en contacto directo y funciona como barrera entre el medio marino y los componentes del sistema electrónico del AUV, así el casco, es el único medio de protección para todo este sistema. Por sí solo, el casco debe proveer dos condiciones: estanqueidad y estabilidad estructural.

La primera propuesta de diseño que se planteó implementa un sistema de tanques de lastre al igual que los submarinos de grandes dimensiones, dichos tanques modifican el peso específico del AUV, para hacer más pesado o más liviano con respecto al peso específico del agua y de esta forma lograr que se sumerja o que salga a flote, esta propuesta requiere de un sistema de bombeo y extracción de agua. *Figura 2-1*

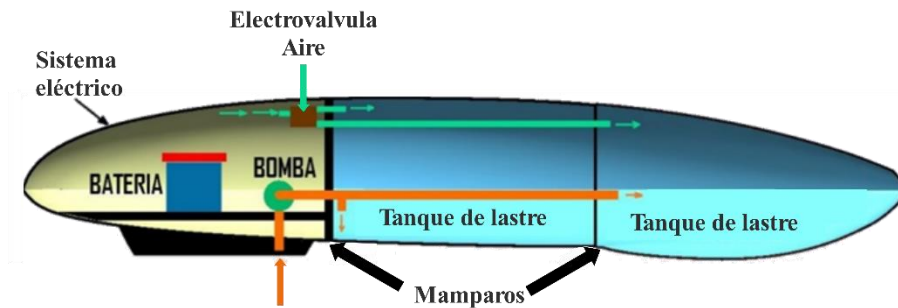


Figura 2-1 casco AUV opción 1

Por otra parte la forma contribuye directamente al consumo de energía, si se piensa que a esta forma le corresponde una magnitud específica de fuerza de arrastre.

El diseño del casco tiene entonces dos requerimientos que a su vez se convierten en dos parámetros de diseño, el primer parámetro será la

consistencia estructural y el segundo parámetro será la forma hidrodinámica, ambos parámetros tienen una relación directa con el material que se seleccione para su fabricación, en primer lugar, se requiere un material resistente, mecánicamente hablando y en segundo lugar se requiere que ese material permita la fabricación de formas hidrodinámicas.

Para el primer parámetro, resistencia estructural, en el estado del arte se encontró que el material que mejor comportamiento tenía al alcanzar las mayores cotas de inmersión era la fibra de carbono, sin embargo, los procesos de fabricación con fibra de carbono requieren de una inversión económica alta, pues para alcanzar resistencia mecánica se deben realizar procesos de curado en autoclaves que proporcionen temperatura y presión de vacío. Después de la fibra de carbono el material que presentaba inmersiones más profundas es el aluminio, además el éste con un proceso de anodizado, presenta excelente resistencia contra la corrosión, la desventaja de este material está en los procesos de fabricación, ya que con el aluminio no se permiten construir fácilmente formas hidrodinámicas, serían necesarios procesos de fundición o inyección de aluminio.

Para el segundo parámetro, formas hidrodinámicas, se puede asegurar que alcanzar altas velocidades está relacionado directamente con la forma del casco, en el análisis del estado del arte, la fibra de vidrio tenía los rangos de velocidad más altos, esto permite afirmar que la fibra de vidrio brinda la posibilidad de fabricar formas hidrodinámicas. Por otra parte, conseguir resistencia estructural usando fibra de vidrio, requiere de un espesor muy grande que influiría en el peso y tamaño del vehículo.

Con todo lo anterior las ventajas que un material presenta para ser aprovechado en la parte estructural son desventajas para fabricar formas hidrodinámicas.

Aislando los requerimientos del casco del AUV y dando solución a cada uno de ellos por separado, es posible cubrir todas las necesidades, con lo anterior la propuesta para el diseño del casco está en:

- Se requiere que el casco del AUV resista la presión hidrostática.
- Se requiere que el casco del AUV tenga una forma tal que la fuerza de arrastre sea baja.

Con el análisis propuesto de aislar los requerimientos, la solución está en la construcción de dos cascos alojando uno en el interior del otro, para cumplir individualmente con los requerimientos planteados, en otras palabras, un casco que resista hidrostáticamente en el interior y otro con forma hidrodinámica en el exterior, de igual manera se puede usar dos materiales diferentes para alcanzar los requerimientos.

2.2.1 Casco hidrostático

El casco hidrostático cumple con la función de brindar un alojamiento estanco a todos los componentes electrónicos, que no están hechos para sumergirse directamente en el agua; es el caso del sistema de alimentación de energía (baterías), la electrónica de navegación y sistema de control entre otros. El tamaño del casco hidrostático está dado por los componentes electrónicos que se necesiten proteger.

Una característica importante que se debe tener en cuenta con el sistema de alimentación de energía, es que al tener que trabajar en un compartimento que no tiene ventilación, no se puede producir ningún tipo de gases, las baterías de plomo con las reacciones químicas típicas de su funcionamiento producen gases explosivos, razón por la cual, y a pesar de ser económicas se deben descartar, por otra parte, las baterías Li-ion son la opción más viable dada su operación sin gases. Un proveedor usado en varios de los vehículos encontrados es Ocean Server Technology Inc. en la *Figura 2-2* se presenta el modelo que se va a usar.



Figura 2-2 Batería Li-ion

Fuente: Ocean server technology Inc.

Además Ocean Server Inc. ofrece un completo sistema de monitoreo que permite administrar la descarga del sistema de alimentación de energía, en la se pueden ver sus componentes, en la Figura 2-3 se presenta en detalle el sistema de alimentación de energía.

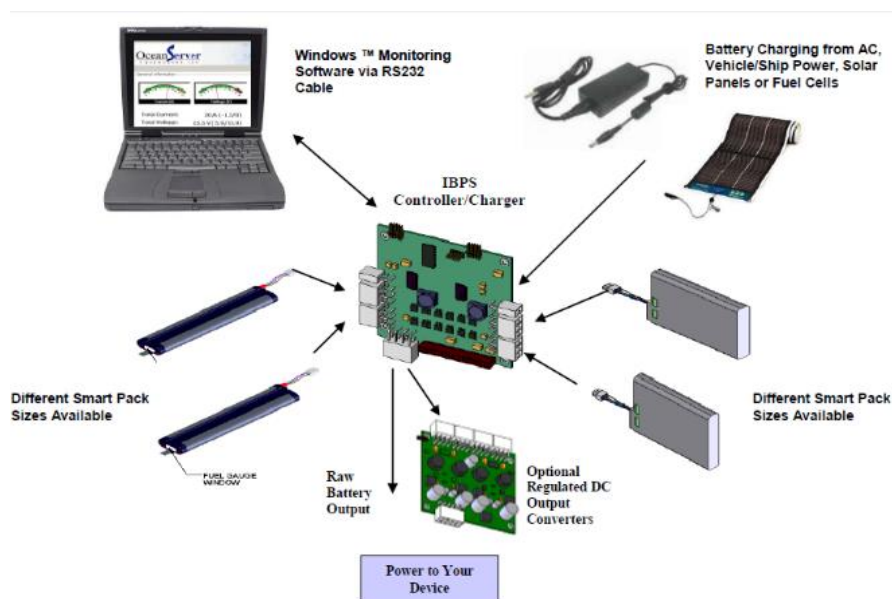


Figura 2-3 Sistema de alimentación de energía

Fuente: Ocean server technology Inc.

El sistema de control estará compuesto por un ordenador donde se centralizará y procesará toda la información entregada por los sensores, motores y sistema de alimentación de energía. Las características del ordenador son:

PC industrial embebido, marca Axiomtek, referencia IPC 916, no usa ventilador, cuenta con un procesador Core2Duo @ 2.53 GHz, con memoria RAM 4GB SDRAM, 3xRS232, 1xRS485, 2 USB 2.0, 2xLAN Gigabit Ethernet and 6 ranuras PCI de expansión.

Fue elegido principalmente debido a su robustez y posibilidades de expansión. En caso de necesitar más potencia de procesamiento, se pueden agregar nuevas placas de procesamiento para crear una arquitectura distribuida basada en Ethernet.



*Figura 2-4 Ordenador de abordo
Fuente: Broadax System Inc.*

Con la información de los componentes básicos que se alojarán en el casco hidrostático, se propondrán diferentes opciones para el diseño del casco hidrostático.

La forma en la que actúa la presión hidrostática, permite que el casco se analice como un cuerpo sometido a presión exterior, o dicho de otra forma un cuerpo sometido a compresión.

Las formas apléxicas, son las más indicadas para aplicaciones en las que no se permite desarrollar momentos flectores y por lo tanto soportar la presión exterior de forma uniforme. La forma geométrica que mejor comportamiento tiene frente a la situación de compresión planteada es la esfera; pero la esfera es la forma menos eficiente en lo que se refiere a acomodar componentes en su interior, las formas cilíndricas presentan buen comportamiento bajo cargas de compresión, ya que su forma distribuye uniformemente los esfuerzos. [4]

Con lo anterior y teniendo en cuenta que la fabricación de un cilindro es sencilla, se adopta la forma cilíndrica para el casco hidrostático del AUV. Como ya se mencionó, el casco hidrostático estará en contacto directo con el agua salada, esta condición hace que el material deba contar con buena resistencia a la corrosión, en primer lugar, se tiene el acero inoxidable AISI-SAE 316 y en segundo lugar el aluminio 6063 el cual tiene una buena resistencia a la corrosión con los tratamientos de anodizado.

En los parámetros de diseño se estableció que la profundidad de trabajo estaría en el rango de 0 a 100 metros, los cuales proporcionalmente ejercer una presión sobre el vehículo. De esta forma se tiene que la presión máxima estará a los 100 metros de profundidad.

Con la información que se tiene se procede a calcular el espesor de la pared que va a tener el casco hidrostático del AUV, se van a evaluar

los dos materiales para seleccionar el que mejor se ajuste a las condiciones plateadas.

- **Cálculo por resistencia de materiales**

En *Tabla 2-1 Propiedades mecánicas* se presentan las propiedades mecánicas de los materiales, acero AISI 316 y aluminio 6063.

Propiedad Mecánica	Acero AISI-SAE 316	Aluminio 6063
Carga de rotura N/mm ²	552	220
Límite de fluencia N/mm ²	207	170
Peso específico gr/cm ³	7,96	2,70

Tabla 2-1 Propiedades mecánicas

En un cilindro sometido a presión se presentan esfuerzos longitudinales σ_L y esfuerzos transversales σ_T , para su cálculo se cuenta con la ecuación (2.1) y la ecuación (2.2).

$$\sigma_T = \frac{P_t * R_c}{t} \quad (2.1)$$

$$\sigma_L = \frac{P_t * R_c}{2 * t} \quad (2.2)$$

Donde:

P_t = Presión de trabajo

R_c = Radio del cilindro

t = espesor del cilindro

De las anteriores ecuaciones se puede concluir que el material falla debido a los esfuerzos trasversales, es por eso que se tomarán como parámetro de diseño.

A pesar de que la fabricación de los cilindros puede considerarse sencilla, cabe anotar que se debe usar un tubo extruido o sin costura, para reducir los concentradores de esfuerzos. El diámetro del tubo dependerá del tamaño de los componentes electrónicos que se alojarán en su interior, el ordenador es el componente de mayores dimensiones por esta razón es el que determinará el diámetro del tubo. El tubo que se adapta a las dimensiones corresponde al normalizado con Schedule 10S, las dimensiones son las siguientes

312 mm diámetro externo

4,58 mm de espesor de pared

Para el cálculo de la presión que debe resistir esta estructura se tiene, que cada 10 metros de profundidad equivalen a la presión de una atmósfera, para tener el valor de la presión absoluta se suma la presión debida al aire, que será una atmósfera más a nivel del mar, de esta forma como se pretende operar a 100 metros de profundidad, se tendría

$$101325 \text{ Pa} (10 + 1) = 1114575 \text{ Pa}$$

$$1,11 \text{ Mpa}$$

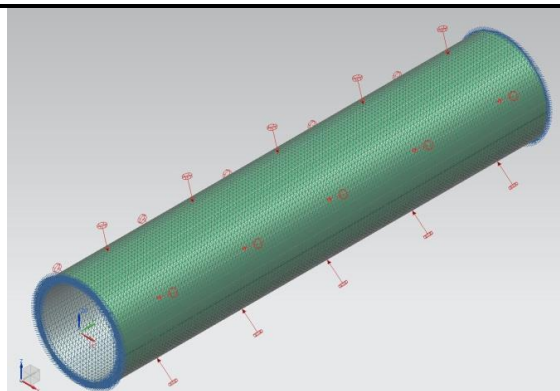
Entonces:

$$\sigma_T = \frac{1,11 \times 10^6 \text{ Pa} * 0,156 \text{ m}}{4,58 \times 10^{-3} \text{ m}} = 37,81 \text{ Mpa}$$

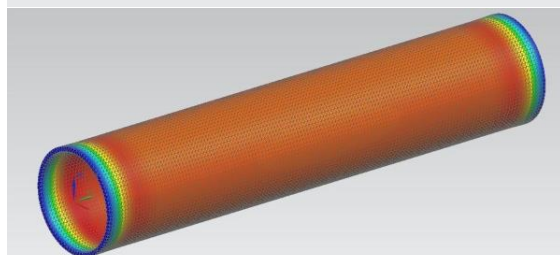
$$\sigma_L = \frac{1,11 \times 10^6 \text{ Pa} * 0,156 \text{ m}}{2 * 4,58 \times 10^{-3} \text{ m}} = 18,9 \text{ Mpa}$$

En ambos casos los valores están por debajo de los admisibles de los dos materiales, de lo que se puede concluir que el tubo seleccionado cumplirá con los requisitos de diseño. Por pesos y por costos se seleccionará el tubo de aluminio ya que el acero inoxidable lo supera en peso y costo.

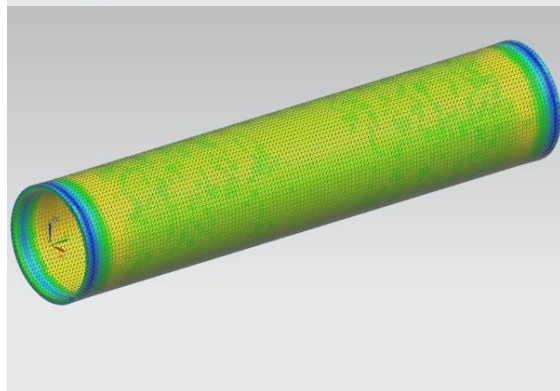
Para verificar el comportamiento de la estructura se realizaron simulaciones de elementos finitos haciendo uso del software NX 7,5 y su módulo de cálculo NASTRAM. En la *Tabla 2-2* se presentan los resultados obtenidos.



Mallado del tubo y aplicación de la presión hidrostática.



Deformaciones máxima 0,0425mm



Esfuerzo máximo 79,75 Mpa

Tabla 2-2 Simulación comportamiento de esfuerzos en casco hidrodinámico

- **Sistema de cierre**

El contacto de distintos materiales metálicos inmersos en un medio líquido puede generar corrosión galvánica, por tal motivo no es recomendable combinar dos o más metales diferentes al tiempo. Como se

seleccionó un tubo para fabricar el casco hidrostático, para los tubos, una opción normalmente usada como sistema de cierre son las bridas, el sistema de bridas consiste en la instalación de un aro con agujeros para tornillos alrededor del tubo, normalmente va soldado, posteriormente con una brida ciega, que es un elemento en forma de disco y con agujeros para tornillos, se cierra la abertura manteniendo el compartimento presurizado. En la *Figura 2-5* se presenta el sistema descrito.



Figura 2-5 Sistema de brida

El sistema de brida resulta poco práctico teniendo en cuenta, que para tener acceso al compartimento es necesario desmontar todos los tornillos que normalmente pueden ser hasta 20 para el diámetro del tubo seleccionado, además como se explicó, la mezcla de metales produce corrosión galvánica y los tornillos son fabricados en acero, con el uso normal las roscas tienden a desgastarse y generarían más problemas, por todo anterior es necesario plantear otra alternativa.

La presión hidrostática puede ser aprovechada para diseñar un sistema de cierre práctico, el comportamiento de la presión, tratará de introducir el sistema de cierre o tapa en el tubo que se dejó como casco hidrostático, generando una forma de tapón se logrará mantener cerrado

el casco en su operación normal, además se podrá abrir fácilmente ya que es un sistema a presión sin más componentes, para evitar que entre agua al casco se utilizarán dos juntas tóricas. En la *Figura 2-6* y la *Figura 2-7* se representa el sistema de cierre que se usará en el casco hidrostático.

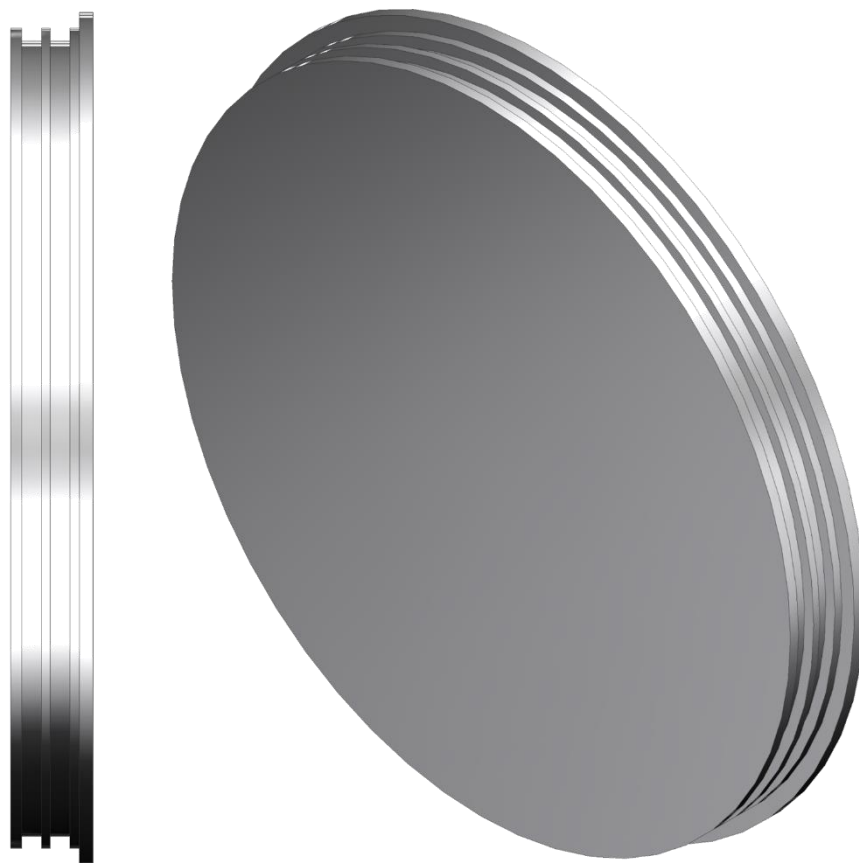


Figura 2-6 tapa tipo tapón

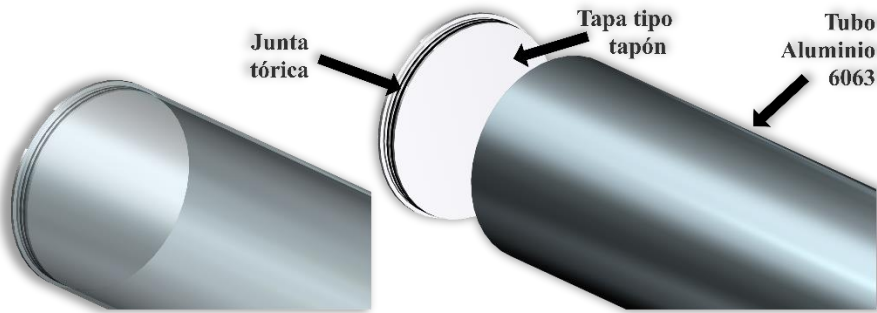


Figura 2-7 Sistema de cierre seleccionado

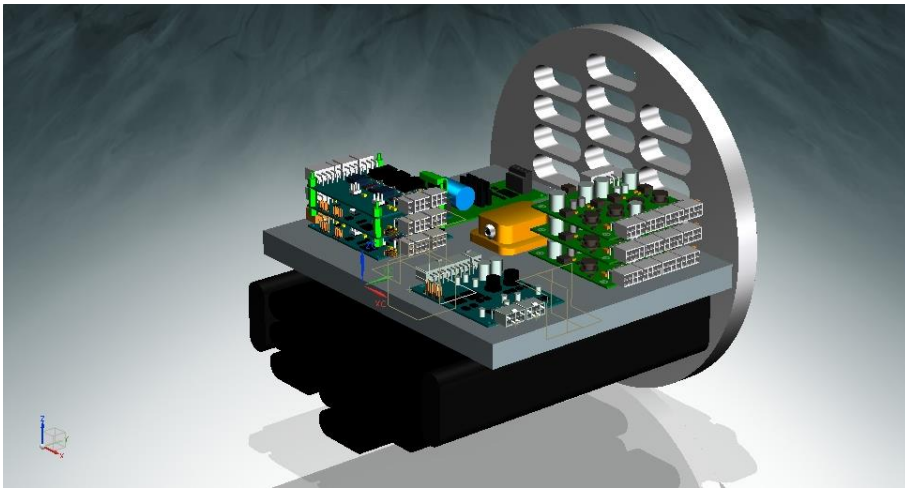


Figura 2-8 Sistema eléctrico

El diseño final del casco hidrostático con todos sus componentes se aprecian la Figura 2-8 y la Figura 2-9.

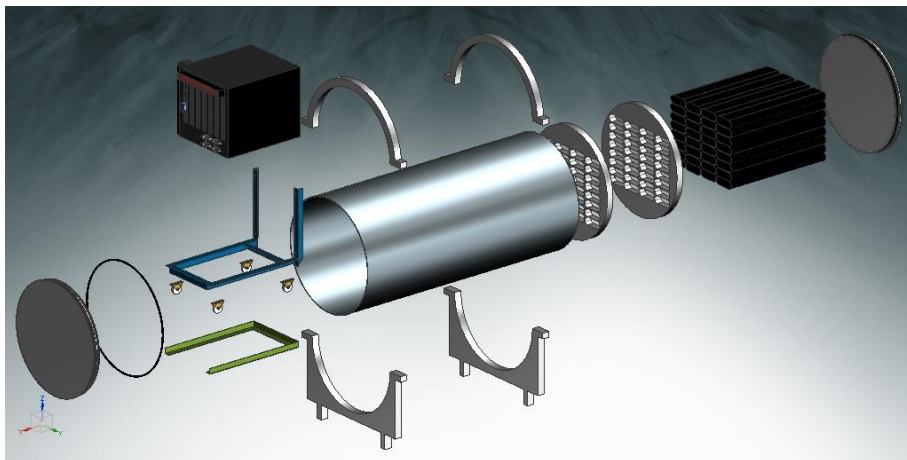


Figura 2-9 Casco hidrostático y sus componentes

2.2.2 Casco hidrodinámico

En el análisis del estado del arte, se evidenció que los UV's de estructura abierta, eran los más lentos en cuanto a velocidad de desplazamiento se refiere, mientras que los vehículos de forma torpedo, ovalado y gota de agua eran los más veloces, la posibilidad de alcanzar altas velocidades está relacionada con las fuerzas de arrastre bajas.

En los parámetros de diseño del AUV se planteó la posibilidad de realizar misiones de vigilancia con el vehículo del proyecto DIVISAMOS, esta condición plantea la necesidad de alcanzar velocidades altas (2 m/s), esto sugiere que será imperativo proponer formas hidrodinámicamente eficientes.

El casco hidrodinámico, cumple con la función de reducir al máximo la fuerza de arrastre generada por el AUV al desplazarse. En la parte interna del casco hidrodinámico estará alojado el casco hidrostático, con esta disposición el casco hidrodinámico hará las veces de carenaje.

El casco hidrodinámico no es estanco, se ha diseñado de forma tal que se permite la entrada de agua teniendo así la misma presión en la cara externa y en la cara interna, esta particularidad genera que este casco no esté sometido a presión hidrostática sin importar la profundidad a la se sumerja.

- **Diseño paramétrico del casco**

Encontrar una relación entre las dimensiones del casco, que conduzcan a reducir la fuerza de arrastre, es una herramienta muy útil que garantizará la obtención de buenos resultados, de aquí la importancia de hacer la revisión necesaria para encontrar parámetros en ese sentido.

El principal parámetro de la forma del casco que determina la eficiencia hidrodinámica del AUV, es la relación existente entre su longitud y su diámetro (factor L/D), en *Figura 2-10* se representa la relación L/D. [5]

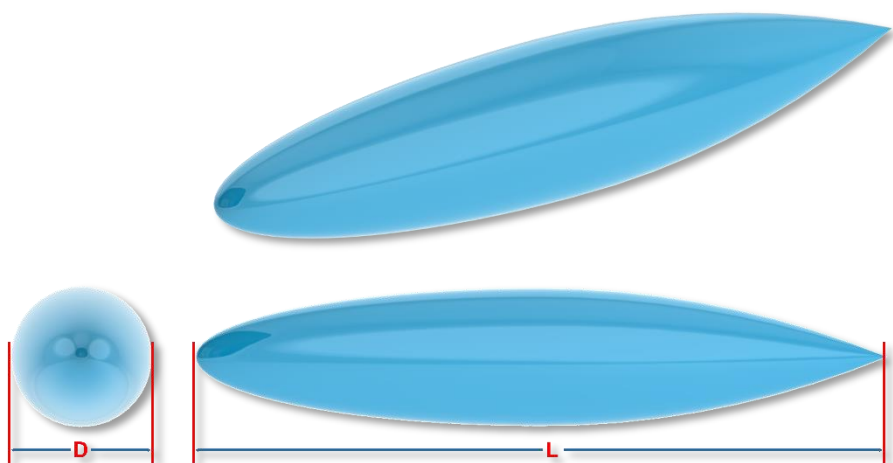


Figura 2-10 Relación L/D

Se deben tener en cuenta dos tipos de arrastre, el debido a la presión y el debido a la fricción de las paredes, la presión se presenta en dirección perpendicular a cada punto de la superficie, siendo máxima en la nariz del submarino, en este punto las líneas hidrodinámicas se separan del AUV. Basado en la teoría de Bernoulli, la presión es más elevada cuando las líneas se separan y se presenta un aumento de la velocidad del fluido. Si el fluido no fuese viscoso, la presión en la cola tendría la misma magnitud que en la nariz, por lo que la integral de las presiones que actúa en el área elemental será 0:

$$\oint p \cdot dA = 0 \quad (2.3)$$

No obstante, el fluido sí tiene viscosidad, lo que produce fuerzas tangenciales o fricción en las paredes. En la *Figura 2-11* se representan las componentes de la fuerza de arrastre.

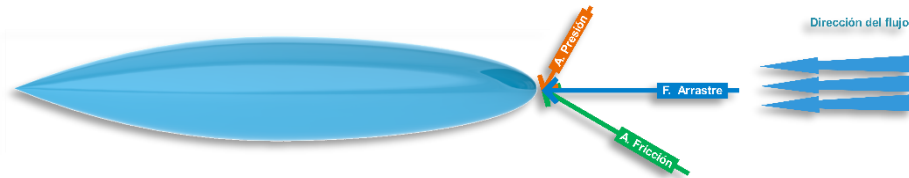


Figura 2-11 Componentes de la fuerza arrastre sobre el casco

El factor L/D presenta diferentes comportamientos en los distintos tipos de arrastre. Con un factor L/D alto, se tiene un cuerpo largo y esbelto, lo que genera que el arrastre debido a la presión disminuya, por el contrario, esto implica que la superficie del cuerpo sea mayor, lo que produce que el arrastre debido a la fricción de las paredes aumente.

El valor óptimo de L/D suele estar sobre 5. El inconveniente es que en esta región la curva combinada de los dos tipos de arrastres es prácticamente plana, por lo que no se puede obtener un mínimo con precisión. En *Figura 2-12* se representa gráficamente. [6]

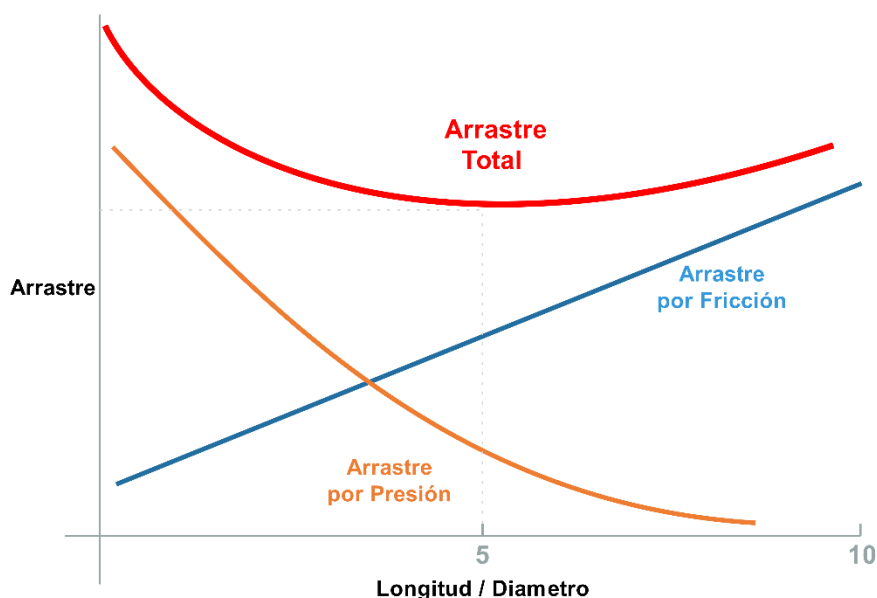


Figura 2-12 Arrastre en función de la relación L/D

La forma ideal implicaría un diámetro variable a lo largo de la longitud del AUV. La proa debería tener una forma elipsoidal, mientras que la popa debería de ser parabólica. La forma de torpedo es muy similar, la variación está en una pequeña sección central paralela (cilíndrica). Esta modificación, reduciría los costes de producción sin una penalización muy severa en el arrastre. Una sección cilíndrica muy grande no solo afectaría aumentando la fuerza de arrastre, sino que también impondría limitaciones a la velocidad y a la autonomía del vehículo, [6] En la Figura 2-13 se presentan las formas que teóricamente mejor comportamiento hidrodinámicamente tienen.

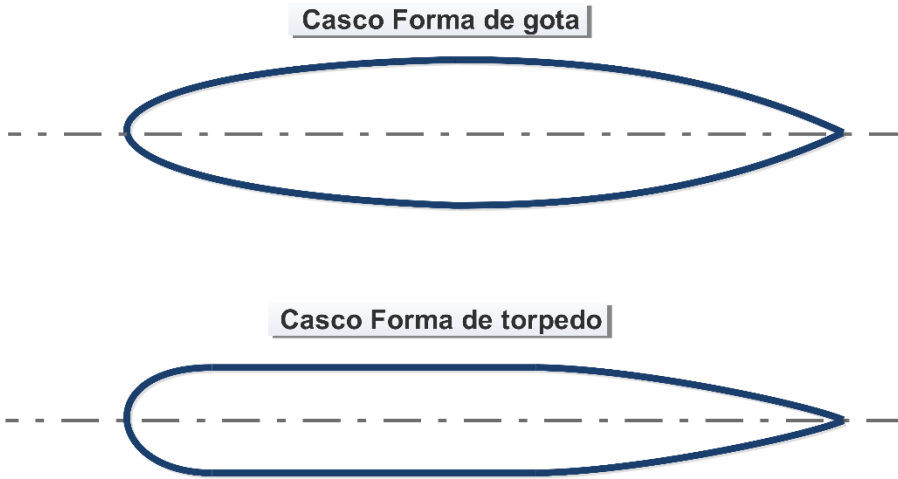


Figura 2-13 Cascos ideales

Teniendo en cuenta todo lo relacionado sobre los parámetros que contribuirían en la reducción de la fuerza de arrastre, se propondrán algunas formas de cascos, que posteriormente se analizarán con CFD para determinar cuál de ellas presenta mejores resultados. En la *Figura 2-14* y en la *Figura 2-15* se presentan los vehículos diseñados. Cabe agregar que al estar parametrizados se pueden modificar para así analizar otros valores de la relación L/D .

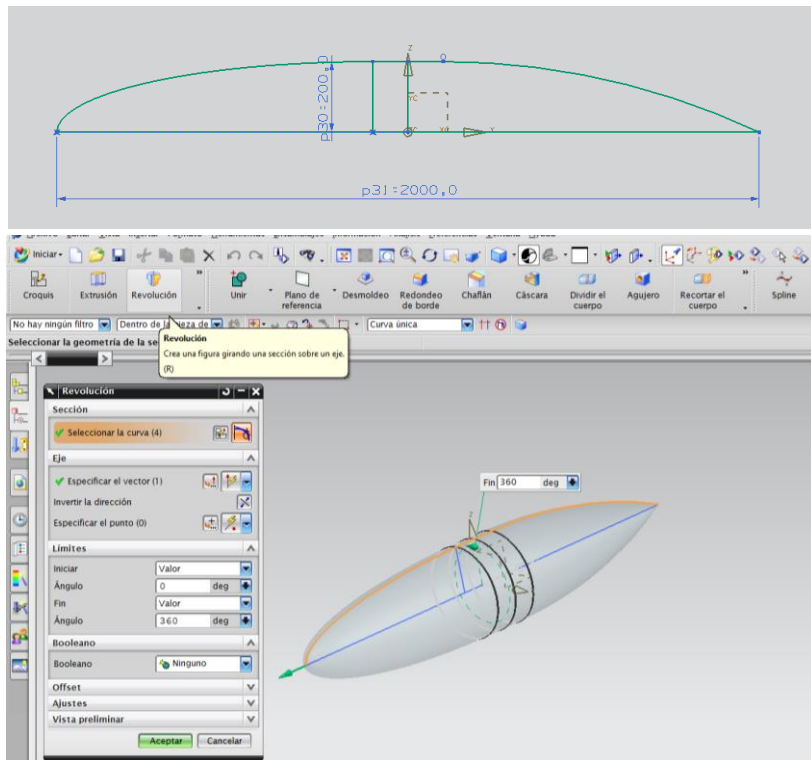


Figura 2-14 Diseño tipo gota de agua parametrizado

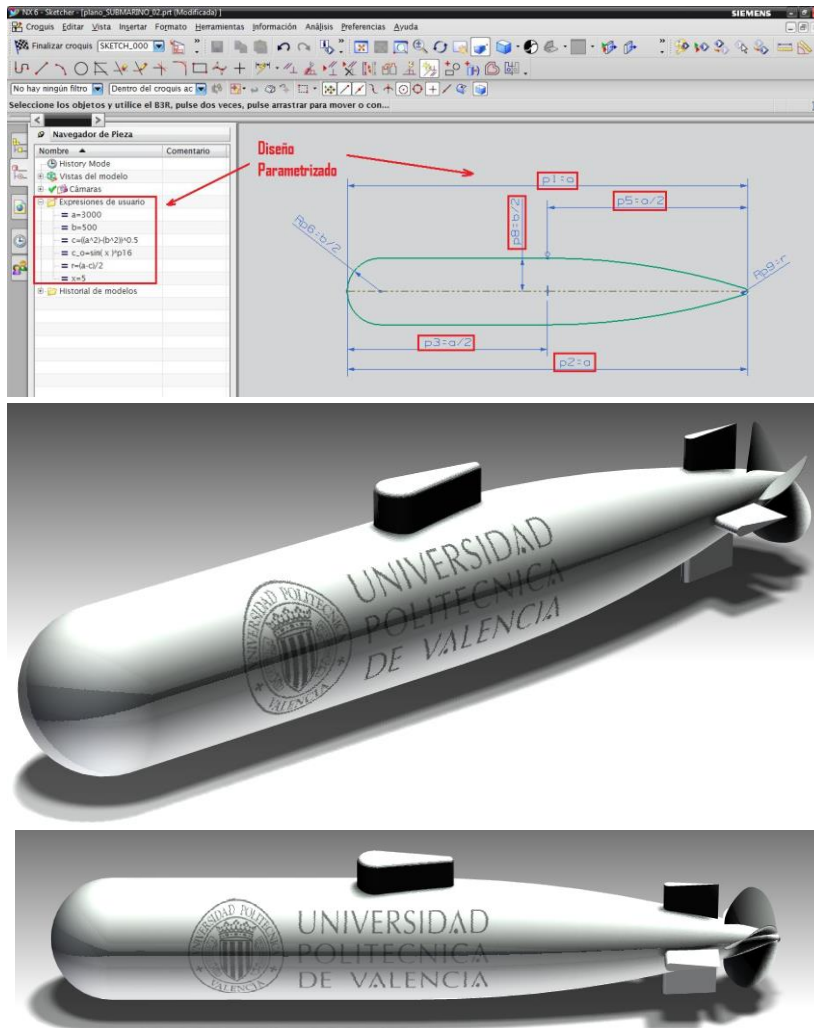


Figura 2-15 Diseño tipo torpedo parametrizado

2.3 ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DEL CASCO

Con los modelos propuestos se va a analizar el comportamiento del parámetro de relación L/D , se analizarán relaciones desde 3 hasta 10 a intervalos de una unidad.

En las condiciones de análisis se puede afirmar que, la variación en el volumen del casco debidas al parámetro L/D son despreciables ya que solo generan cambios menores al 1%, además el objetivo del análisis radica en determinar el comportamiento debido al diámetro y la longitud. Por otra parte, cabe aclarar que el planteamiento del análisis CFD fue el siguiente:

- El casco está rodeado por un volumen de control (fluido) prismático.
- El agua es el fluido utilizado, penetra por un lado a una velocidad 2m/s y sale por el opuesto sin que haya succión ninguna.

En la *Figura 2-16* se observa el mallado tipo del casco, el mallado del volumen del control, y una representación de las condiciones de contorno bajo las cuales se han realizado los experimentos, las condiciones para todo los ensayos fueron las mismas, tanto para el casco con forma de gota como para el tipo torpedo con sus correspondientes modificaciones del parámetro L/D .

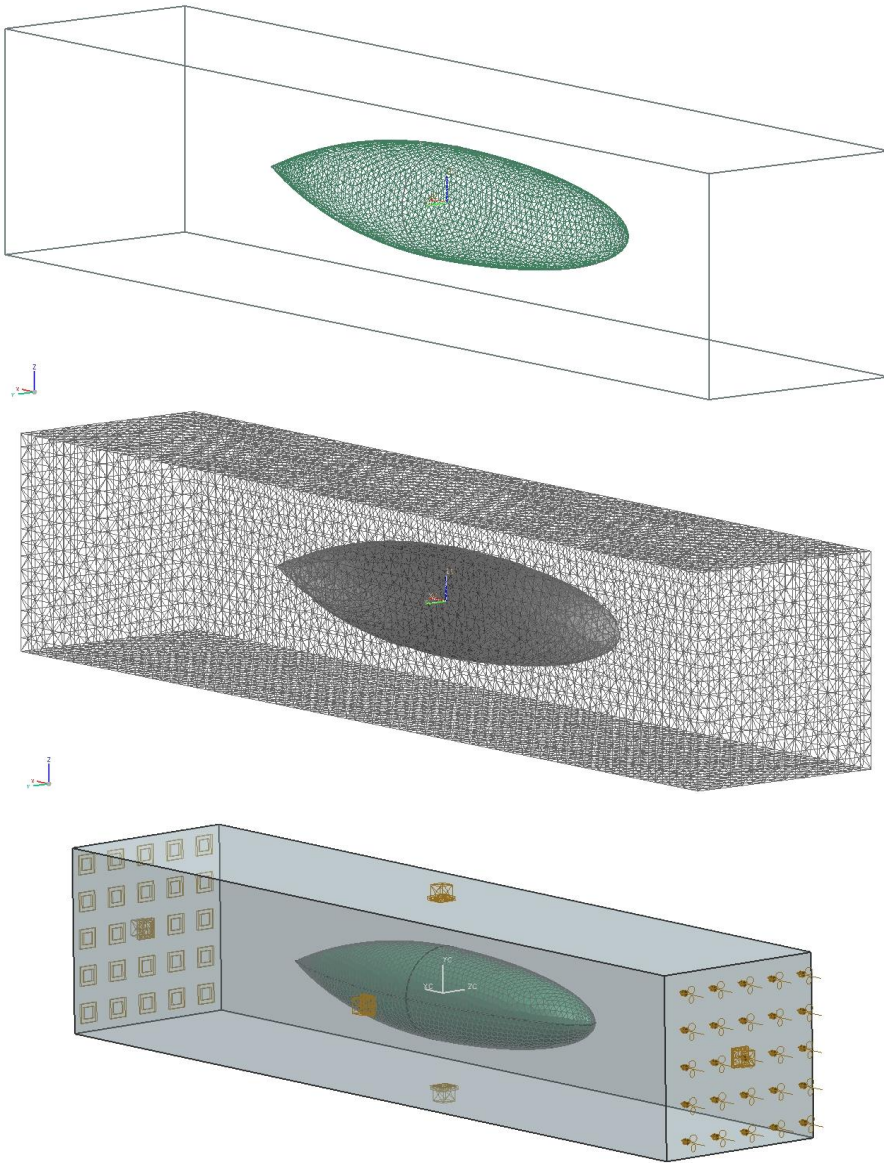


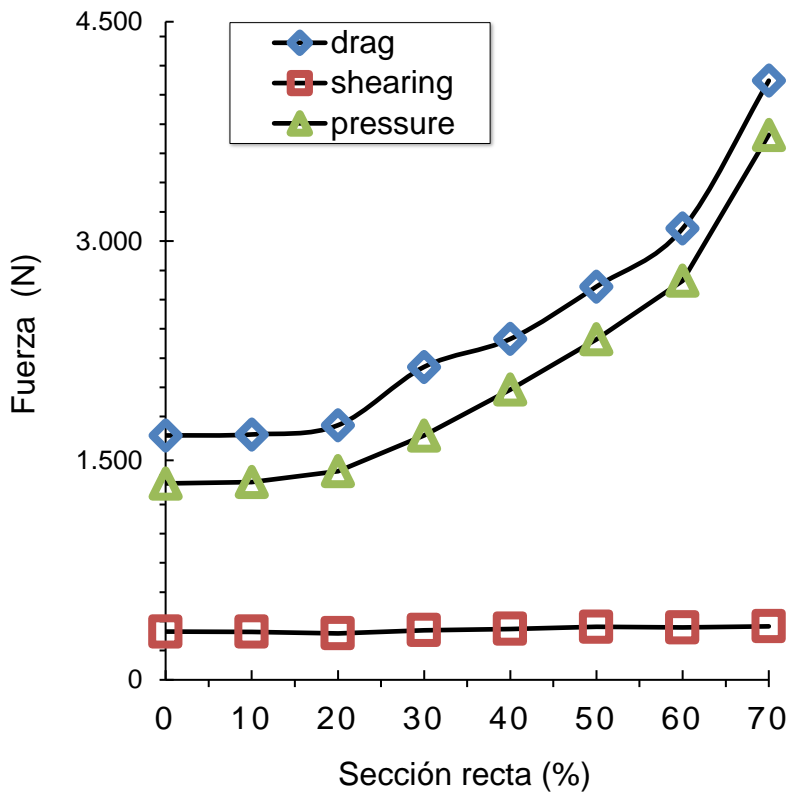
Figura 2-16 Esquema del análisis CFD realizado

2.3.1 Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando la relación L/D

A continuación en la *Tabla 2-3* y la *Figura 2-17* se muestran los resultados obtenidos en el análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando la relación L/D.

L/D mm/mm	Force Variation		
	Drag (N)	Shearing (N/m ²)	Pressure (N/m ²)
3	4300	436,8	3866
4	3108	473,9	2639
5	2421	495,5	1926
6	2140	545,1	1605
7	1946	555,5	1411
8	1786	590,6	1193
9	1702	599,6	1111
10	1637	627,9	1009

Tabla 2-3 Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando la relación L/D



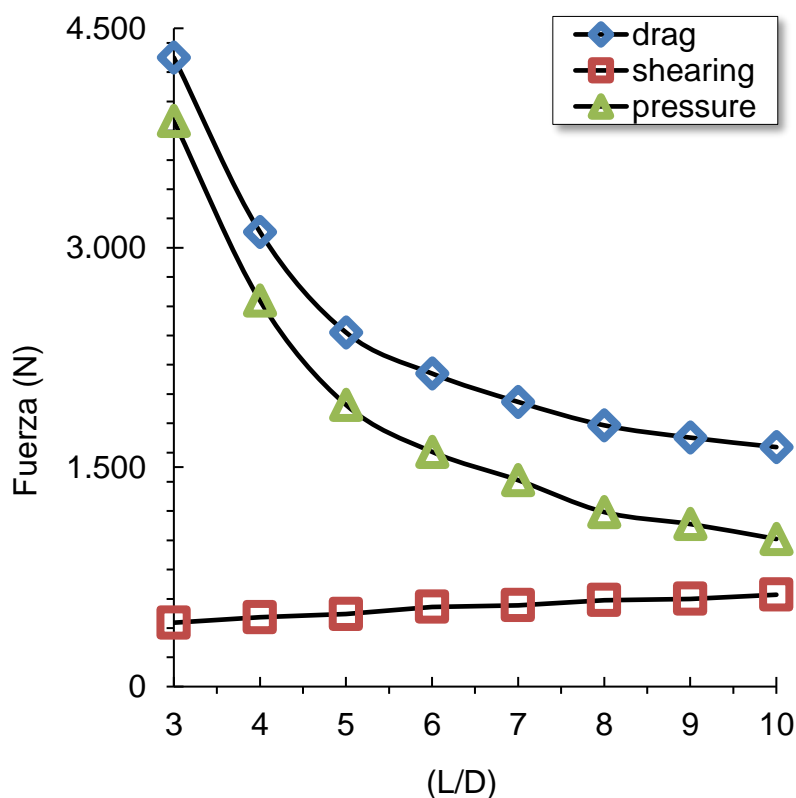


Figura 2-17 Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando la relación L/D

En la Figura 2-17 se puede apreciar que el arrastre es el parámetro que alcanza los valores más altos, teniendo en cuenta esto será un parámetro decisivo para definir la relación L/D , además es evidente como la magnitud del arrastre disminuye a medida que aumenta la relación entre L/D . Dadas las características necesarias en un AUV, se pueden consolidar modelos que tenga una relación L/D como mínimo de 5, para tener un equilibrio en todos los valores analizados.

2.3.2 Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando el tramo recto

Se ha considerado la inclusión de un tramo recto en la región media del cuerpo del casco, la longitud total del AUV es fija e igual a 2000mm y teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones anteriores, se tendrá una relación L/D de 5. Adicionalmente se consideró la variación del tramo recto en función de un porcentaje de la longitud del casco, analizando desde 0 hasta 70% del valor total, en variaciones de 10%.

En la *Tabla 2-4* y la *Figura 2-18* se muestra la configuración obtenida para un casco de 70% de tramo recto, de igual forma se crearon los demás cascos para todas las combinaciones.

Sección recta (%)	Force Variation		
	Drag (N)	Shearing (N/m ²)	Pressure (N/m ²)
0	1671	329,8	1343
10	1678	328,6	1353
20	1741	317,5	1427
30	2140	339,8	1671
40	2331	347,9	1985
40	2689	362,4	2329
60	3086	357,9	2730
70	4097	365,7	3727

Tabla 2-4 Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando la sección recta

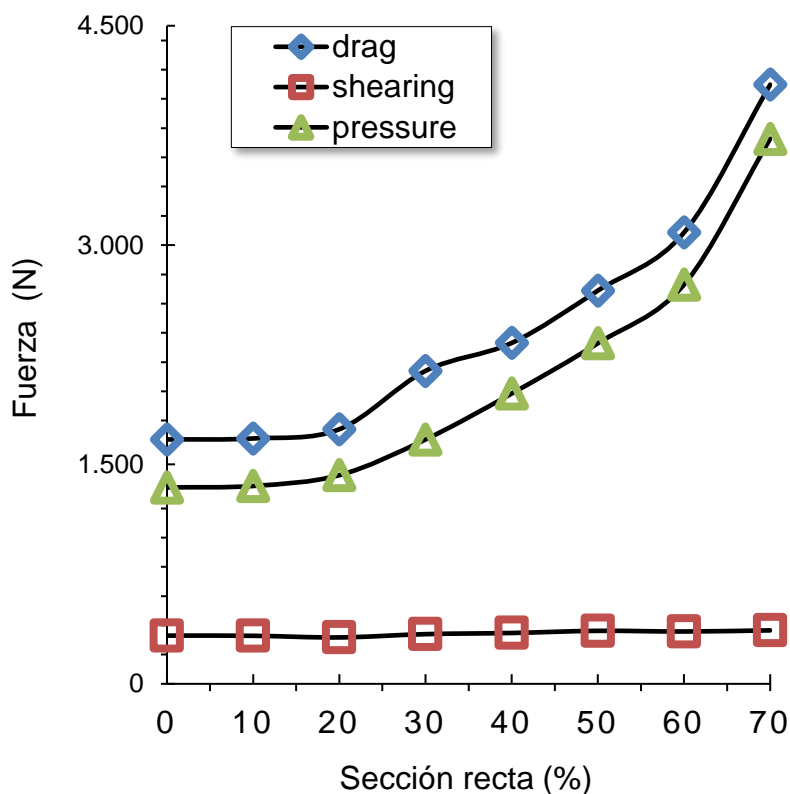


Figura 2-18 Análisis de las componentes de la fuerza hidrodinámica variando la sección recta

Se hace evidente, que mientras los cortantes son prácticamente constantes, los valores del arrastre y la presión aumentan a medida que se incrementa el tramo recto, de lo que se puede concluir que no son favorables tramos rectos de más del 20% de la longitud total del AUV.

2.3.3 Análisis de diferentes ángulos de incidencia del fluido

Consolidando los resultados de las simulaciones anteriores, se usará un casco con una relación de L/D igual a 5, ya que este fue el que mejor comportamiento presentó.

Es alta la posibilidad de enfrentar diferentes ángulos de incidencia de corriente, teniendo en cuenta que el AUV puede desplazarse en tres dimensiones, esta condición posibilita diferentes combinaciones entre la orientación del ángulo de incidencia de la corriente y la orientación del AUV. Para el caso de estudio se supuso que: el AUV está en una misión de investigación y requiere mantener una posición para toma de datos, el AUV siempre está sumergido en agua que mantiene su densidad constante; para todas las variaciones de los ángulos de ataque el área transversal al ángulo de ataque se asumió como la máxima, la velocidad de la corriente constante de 3 m/s, como es la máxima velocidad para una corriente marina esto implicará que se presente la mayor Fuerza hidrodinámica.

Con la situación descrita y para poder analizarla se plantea que, por medio de la implementación de un sistema de coordenadas esféricas, se representa el punto “o” sobre la superficie del casco, en donde estaría impactando la corriente que se supone. La orientación de esta corriente está descrita entre los puntos “o” y “P” y por los ángulos α y β , que se forman entre ese vector y el eje Z y la proyección del mismo vector y el eje X.

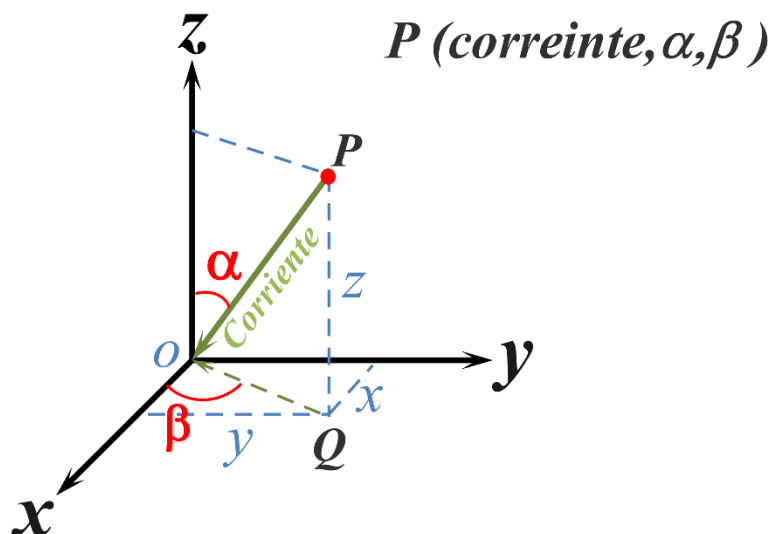


Figura 2-19 Corriente en coordenadas esféricas

Para el análisis CFD, se colocará el casco inmerso en el volumen de control y se le variará la posición dentro del volumen del fluido respecto a un sistema de referencia alineado y situado en el centro de este último. Dada la simetría se variará un ángulo horizontal β entre 0° y 180° , situando un punto cada 30° , y un ángulo vertical α entre 0° y 180° , considerándose también un punto cada 30° , con esta combinación se puede asumir que se analiza la totalidad del AUV dada su forma simétrica. El casco se introducirá en un volumen cúbico. El fluido entrará siempre por un lado del cubo, saliendo sin succión por el lado opuesto. En la Figura 2-20 se muestra la distribución de los ángulos de incidencia.

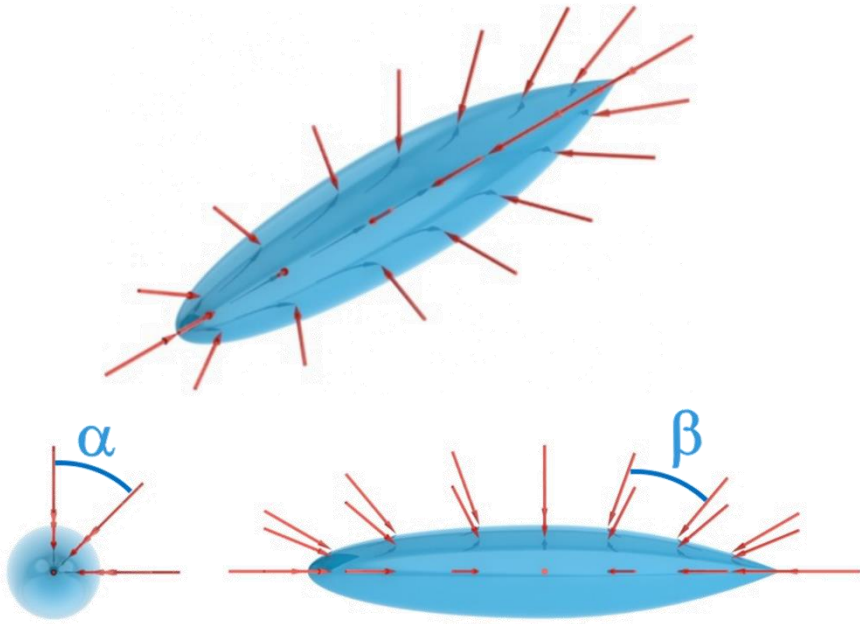
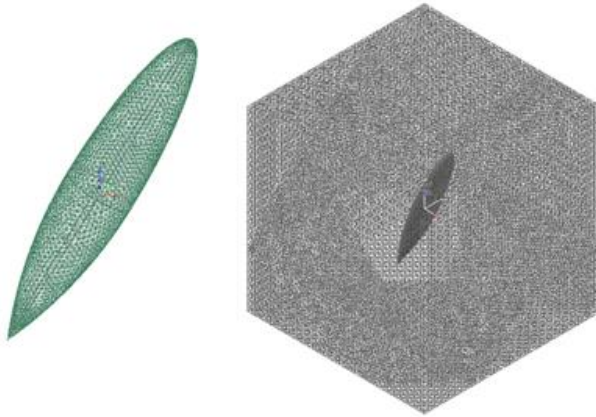


Figura 2-20 Variación ángulos α y β

Las configuraciones para las simulaciones dan como resultado el ejemplo mostrado en la Figura 2-21.



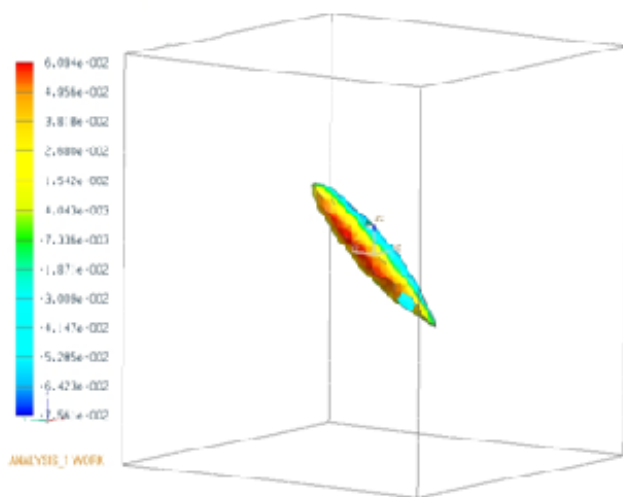


Figura 2-21 Configuración para la simulación variando el ángulo de incidencia

Los Resultados de la simulación variando el ángulo de incidencia muestran en la *Tabla 2-5*

Ángulo (β)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Arrastre Total (N)
$\alpha=0$				
0	2050	511,8	60,37	2113
30	11710	1575	18200	21700
60	38240	973,4	21480	43870
90	54820	1850	287,7	54850
120	37990	2761	20390	43210
150	12490	669,5	18470	22310
180	2058	117,5	438,7	2107
$\alpha=30$				
0	12990	18980	398	23000
30	21650	18070	14680	31790
60	44620	12110	14620	48490
90	56890	1991	520,3	56920
120	47660	11050	16999	51790
150	22355	18570	14420	32440
180	12840	18830	416,1	22800
$\alpha=60$				
0	40510	22690	1388	46450
30	45320	21240	3802	50190

Ángulo (β)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Arrastre Total (N)
60	50600	5756	1866	50960
90	56600	300,7	273,3	56600
120	49170	6629	1687	49640
150	46280	20800	5583	51040
180	41240	23320	4347	47580

Tabla 2-5 Resultados de la simulación variando el ángulo de incidencia

En la Figura 2-22 se compilan los resultados obtenidos en las simulaciones combinando los giros (β, α).

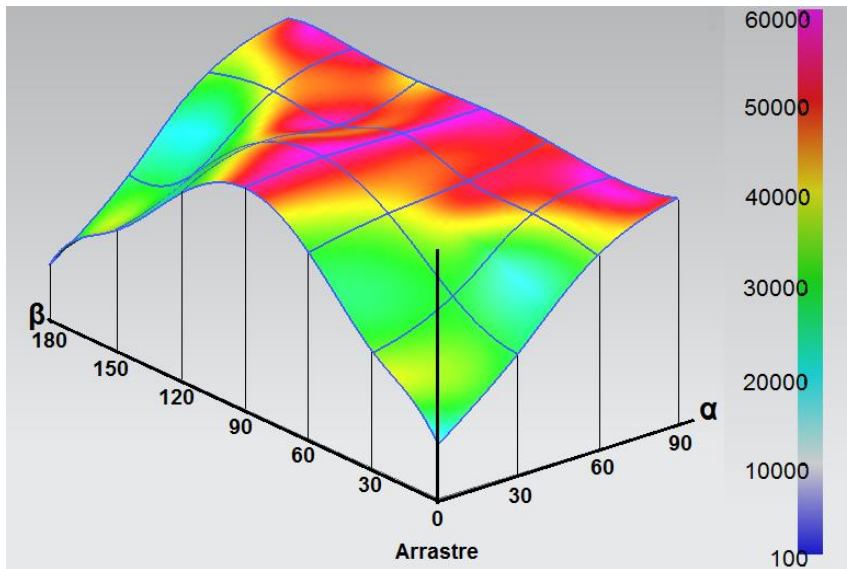


Figura 2-22 Resultados de la simulación variando el ángulo de incidencia

En las simulaciones se ha verificado que un incremento de la velocidad de desplazamiento viene acompañado de un aumento de las componentes de la fuerza de arrastre. El aumento de la fuerza de arrastre y de los valores máximos de los esfuerzos en la superficie, se produce de forma cuadrática, como se podría esperar analizando las ecuaciones a partir de las que se calculan.

$$F_a = -\frac{1}{2}C_d A_p \rho v^2 \quad (2.4)$$

Donde:

F_a : Fuerza de arrastre

C_d : es el coeficiente de arrastre

A_p : es el área transversal del cuerpo de acuerdo al ángulo de incidencia

ρ : es la densidad del fluido

v^2 : es la velocidad del fluido al cuadrado

Con las condiciones que se plantearon en el caso de estudio, se puede asumir de la ecuación (2.4) que para un ángulo de incidencia igual, algunos términos son constantes, ya que el agua en la que el AUV está sumergido mantiene su densidad, el área transversal se tomara como la mayor y la velocidad se tomará como la máxima esperada en una misión de investigación 3 m/s, con esto una se tendrá la constante que se llamará $K_{arrastre}$ así:

$$K_{arrastre} = -\frac{1}{2}\rho A_f v^2$$

Bajo estas condiciones la Ecuación (2.4) pude reescribirse así:

$$F_a = K_{arrastre} C_d$$

La magnitud del C_d se obtiene mediante las simulaciones CFD, entonces se podría calcular F_d en un ángulo de ataque específico.

Entonces se tendrá:

$$F_{a_1} = K_{arraastre} C_{d_1} \quad (2.5)$$

Si se modifica el ángulo de incidencia se tendrá

$$F_{a_2} = K_{arraastre} C_{d_2} \quad (2.6)$$

Para calcular la magnitud de F_{a_2} de (2.5) y (2.6)

$$\begin{cases} F_{a_1} = K_{arraastre} C_{d_1} \\ F_{a_2} = K_{arraastre} C_{d_2} \end{cases} \quad (2.7)$$

Resolviendo (2.7) se igualan los terminos $K_{arraastre}$

$$F_{a_2} = F_{a_1} \frac{C_{d_2}}{C_{d_1}} \quad (2.8)$$

Utilizando el método de regresión polinomial fue posible obtener una correlación polinómica de segundo orden para predecir los valores del Coeficiente de arrastre para cualquier ángulo de ataque. Con estos valores es posible calcular de forma directa la fuerza hidrodinámica para cualquier ángulo de ataque al que se vea sometido el AUV.

Con los coeficientes que se presentan en *Tabla 2-6*.

Para agilizar el cálculo las correlaciones se aproximarán a la forma $C = K \cdot C_d$. Se ajustó un valor de K para el rango de velocidades específico en que trabaje el AUV, ya que cuanto menor sea este, mejor será el ajuste a la forma mencionada.

Presión máxima superficie (V(m/s))	x^2	x	Independiente	R^2	C_d
1	0.0006	0.0002	-0.0007	1	0.000559
2	0.0004	0.0003	-0.0014	1	0.000436
3	0.0003	0.0005	-0.0025	1	0.000346

Tabla 2-6 Resultados de la Fa obtenido con la ecuación planteada

Con esta formulación se obtiene una tabla con valores que permite calcular directamente la fuerza de arrastre, para cualquier velocidad de forma directa considerando el ángulo de incidencia del fluido.

Este aporte se puede aprovechar en el modelo matemático, incluyendo un valor de fuerza de arrastre, que en la mayoría de los modelos lo consideran constante, pero con esta fórmula y unos valores bases, es posible calcular con mayor aproximación y en tiempo real, el valor de la fuerza de arrastre disminuyendo el costo computacional de hacer simulaciones CFD.

2.4 PROPUESTA DE DISEÑO

Con los resultados obtenidos en los numerales 2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO, 2.2 DISEÑO DEL CASCO y 2.3 ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DEL CASCO, se consolidará una propuesta de diseño para el AUV.

- **Maniobrabilidad**

La maniobrabilidad es una característica de gran importancia para la operación de un AUV, la posibilidad de realizar rotaciones con radios de giro cercanos a cero es una de las habilidades más significativas con la que puede contar un AUV, ya que le permite hacer una rotación de 180 grados de forma ideal, esto quiere decir que prácticamente gira sobre su propio eje, la posibilidad de realizar este movimiento se da gracias a los motores-propulsores instalados, estos propulsores dada su instalación no permiten giro de los mismos, generando así que la fuerza producida sea vectorial en una sola dirección, la combinación del funcionamiento permitirá realizar giros.

El AUV diseñado en esta investigación contará con cuatro impulsores vectorizados, que le permitirán hacer rotaciones guiñada o derrape sobre el eje coordenado Z (yaw), obteniendo radios de giro cero y adicionalmente rotaciones de cabeceo sobre el eje coordenado Y (pitch). En la *Figura 2-23* se muestra la disposición mencionada.

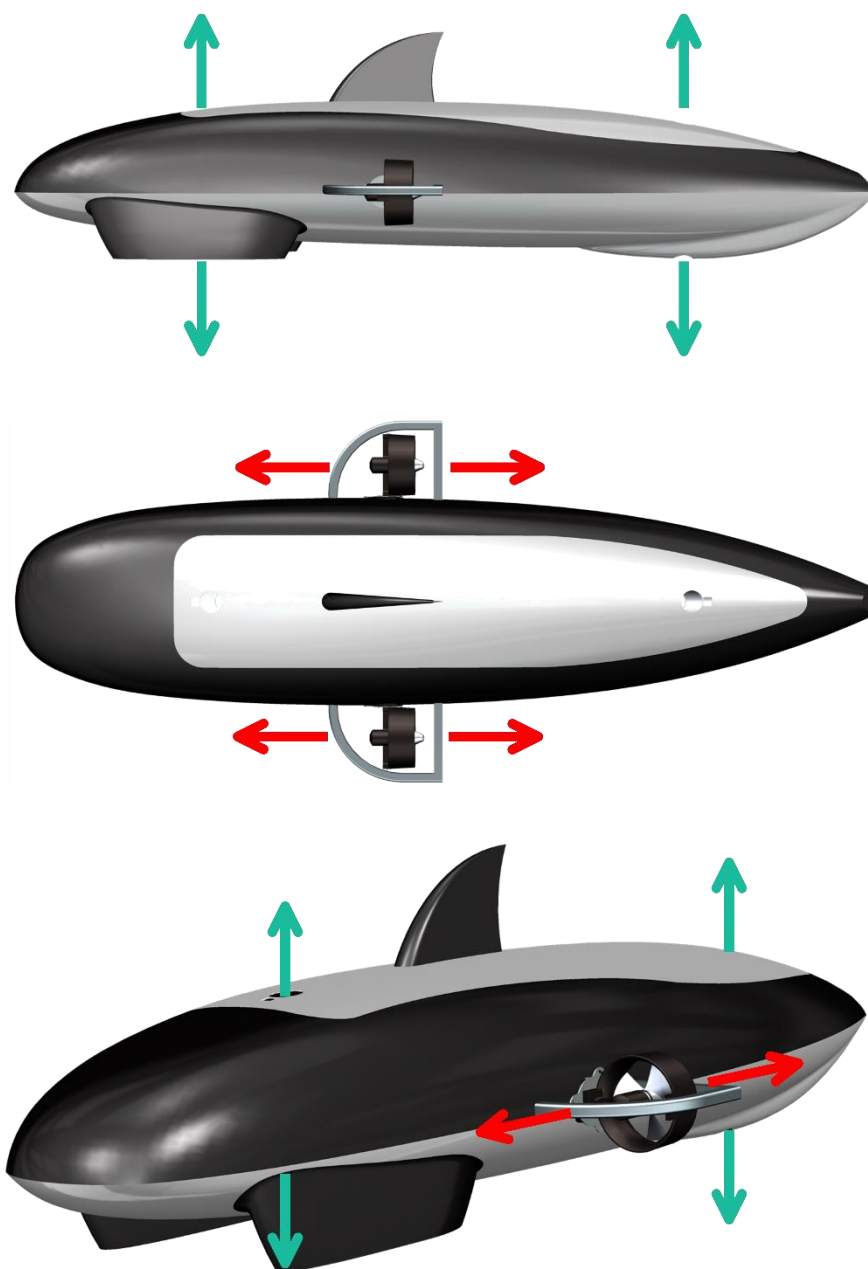


Figura 2-23 Ubicación de los impulsores vectorizados

- **Parámetros del AUV**

En cuanto a la forma quedó demostrado que la que mejor comportamiento presenta es la de gota con una relación de 5 veces L/D , el AUV se construyó de 3000 mm de longitud y 600 mm de diámetro mayor ver *Figura 2-24*. En el numeral 2.2 DISEÑO DEL CASCO, se determinaron la forma y dimensiones del casco hidrostático, dichas dimensiones se tendrán en cuenta, ya que el casco hidrodinámico contendrá el casco hidrostático.

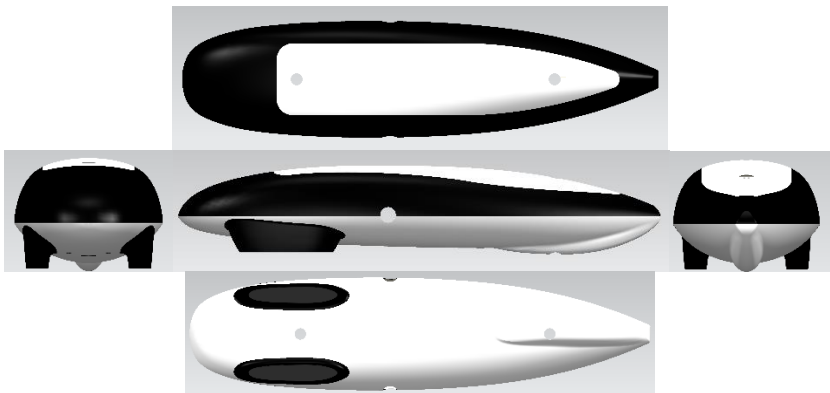


Figura 2-24 Diseño del casco hidrodinámico

Teniendo en cuenta lo anterior, se deben proporcionar dos condiciones: la primera es que el casco hidrostático tenga un sistema que lo una al casco hidrodinámico y la segunda que haya una apertura en el casco hidrodinámico que permita acceder al casco hidrostático con facilidad. Ver *Figura 2-25* y *Figura 2-26*

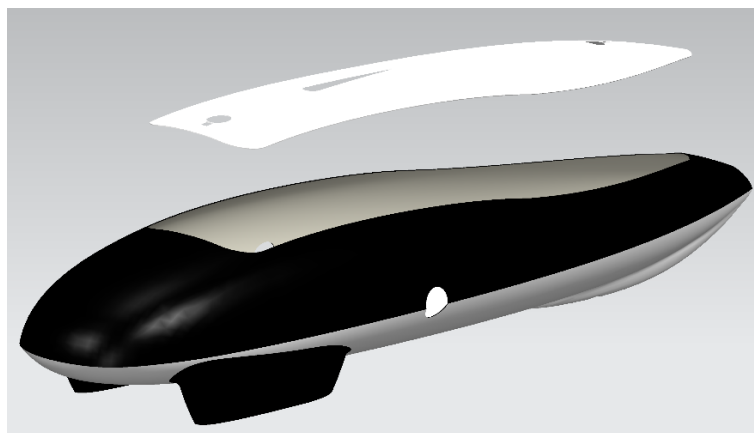


Figura 2-25 Acceso para casco hidrostático

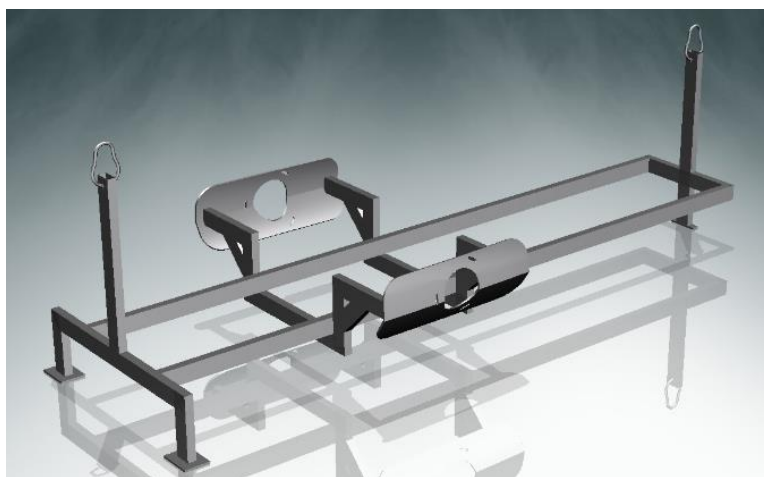


Figura 2-26 Estructura soporte

Además del casco hidrostático, los sensores también requieren de un sistema de acople. Teniendo en cuenta lo que se mencionó respecto a la corrosión galvánica se utilizará un material no metálico para evitar ese problema. El acetal es un material polimérico, resistente a la corrosión fácil de maquinar, liviano y como no estará expuesto a grandes cargas es perfecto para la aplicación que se necesita. En *Figura 2-27* se presenta el diseño propuesto.

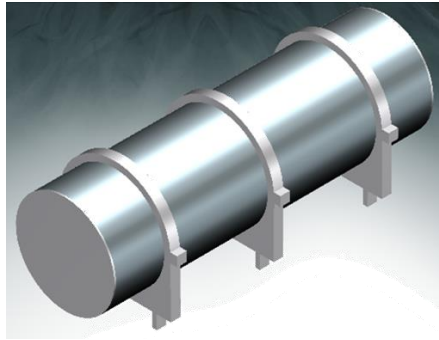


Figura 2-27 soportes acetabular

Los ROV normalmente son vehículos de estructura abierta, se puede afirmar que solo cuentan con una estructura que resiste la presión hidrostática, esta particularidad los hace lentos; por otra parte tiene la capacidad de operar en modo hovering, que significa que pueden permanecer estáticos en una posición (profundidad y orientación) sin necesidad de avanzar en ningún sentido, similar a lo que hace un helicóptero, esto le permite realizar misiones que vehículos como los tipo torpedo no pueden ejecutar ya que necesitan estar en movimiento para no hundirse, un ROV es a un torpedo como un helicóptero es a un avión. Para el diseño de este AUV se combinarán estas dos características, el hovering del ROV y la forma hidrodinámica de torpedo para alcanzar altas velocidades, por otra parte, usando espuma de alta densidad se logra flotación positiva, en *Figura 2-28* se representa el modo en que se usará.

Aunque no se cuenta con ningún mecanismo para ejercer giro alrededor del eje X (roll), la disposición de los elementos y por ende el centro de masa en la parte inferior y el centro de flotación en la parte superior, gracias a la espuma, generan una corrección natural por el torque que producen estos dos, manteniendo el vehículo alineado.

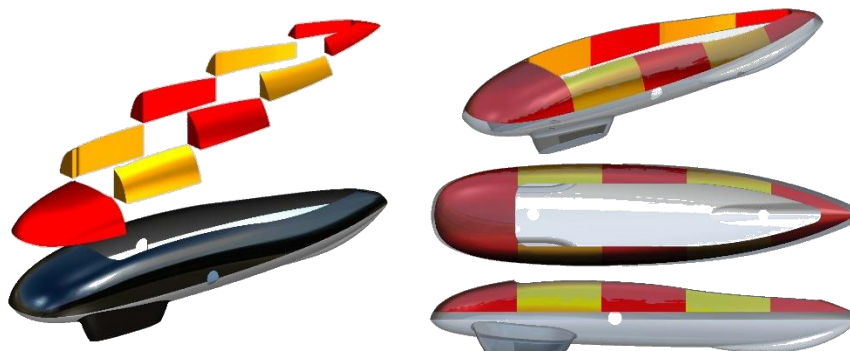


Figura 2-28 Distribución de espuma de alta densidad

2.5 SISTEMA DE PROPULSIÓN

El desplazamiento del AUV depende directamente de la fuerza de arrastre que genere la forma del casco, para determinar la fuerza de arrastre ejercida por el casco diseñado se hicieron simulaciones CFD, además se debe tener en cuenta la velocidad de 2,06 m/s que se quiere alcanzar. A continuación, se presentan los cálculos de la potencia requerida y la selección de los motores.

2.5.1 Cálculo de la potencia requerida

Se espera que el AUV alcance una velocidad de 4 nudos y se estiman que se pueden llegar a tener corrientes en contra de hasta 2 nudos.

$$1 \text{ nudo} \rightarrow 1,854 \frac{\text{km}}{\text{h}} * \frac{\text{h}}{3600 \text{ s}} = 0,515 \text{ m/s}$$

$$4 \text{ nudos} \rightarrow 2,06 \text{ m/s}$$

$$5 \text{ nudos} \rightarrow 2,575 \text{ m/s}$$

$$6 \text{ nudos} \rightarrow 3,09 \text{ m/s}$$

Para determinar los requerimientos de potencia, se deben tener los valores de la resistencia hidrodinámica la cual depende de la velocidad de desplazamiento, estos valores se obtuvieron realizando simulaciones CFD con el software NX. Para este cálculo se supone una corriente frontal que es la que más afecta el desplazamiento del AUV.

- Para una velocidad de 4 nudos se tiene

$$F_a = 185,6 \text{ N}$$

$$185,6 \text{ N} * 2,06 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 382,336 \text{ W}$$

- Para una velocidad de 5 nudos se tiene

$$F_a = 289,6 \text{ N}$$

$$289,6 \text{ N} * 2,575 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 745,72 \text{ W}$$

- Para una velocidad de 6 nudos se tiene

$$F_a = 417,5 \text{ N}$$

$$417,5 \text{ N} * 3,09 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1290,075 \text{ W}$$

Como se mencionaba anteriormente se espera que el AUV alcance una velocidad de 4 nudos, estimando que se pueden llegar a tener corrientes en contra de hasta 2 nudos, entonces se estima que la velocidad a alcanzar debería ser de 6 nudos, pero, dado el incremento en la demanda de potencia, se sacrifica velocidad suponiendo que solo se alcanzarán 5 nudos y en caso de tener corrientes en contra de 2 nudos se estará avanzando a una velocidad de 3 nudos, teniendo un requerimiento de potencia de 745,72 W.

2.5.2 Selección de los propulsores

Una vez calculados los requerimientos de potencia se buscan los motores que cumplan con estos requisitos, adicionalmente para temas de maniobrabilidad se decidió usar dos motores, uno a cada lado y coincidentes con el eje de avance del AUV; de esta forma la potencia requerida está dividida en dos motores de 372,86 W aproximadamente. Se cuenta con tres opciones las características de cada uno de ellos se muestra en la *Tabla 2-7*, las tres opciones son motores de marcas reconocidas el robótica submarina.

Nombre	Fabricante	Potencia	Peso	Voltaje	Depth
400HFS Hi-Flow Thruster	CrustCrawler Inc.	400 W	900 gr	0 – 50 Vdc	100 m
Model 300	Tecnadyne a Tecnova inc. Company	475 W	700 gr	24 -28 Vdc	850 m
Seaeye SM7 thruster MCT 1	SAAB Seaeye	300W	4.3 kg	48 Vdc	1000m

Tabla 2-7 Opciones de propulsores

De las tres opciones presentadas se seleccionó la marca SAAB, esta opción plantea un rango de profundidad de trabajo mayor al esperado, en cuanto a la potencia está por debajo de la calculada, pero la calculada está afectada por la suposición de una corriente en contra. Además, para alcanzar la velocidad de 2 m/s solamente se requieren 382W. En la *Figura 2-29* se presentan el modelo de propulsor seleccionado.



Figura 2-29 Propulsores seleccionados

El sistema de propulsión seleccionado garantizará el desplazamiento del AUV en el eje X (eje de avance) a la velocidad planteada, además se dispondrán a cada lado y del casco sobre el centro geométrico, esto le permitirá tener un radio giro cero, o en otras palabras girar en su puesto. Para las maniobras de inmersión y emersión se dispondrán dos propulsores que generaran cabeceo y de esta forma se avanzará en el eje Z. *Figura 2-30*

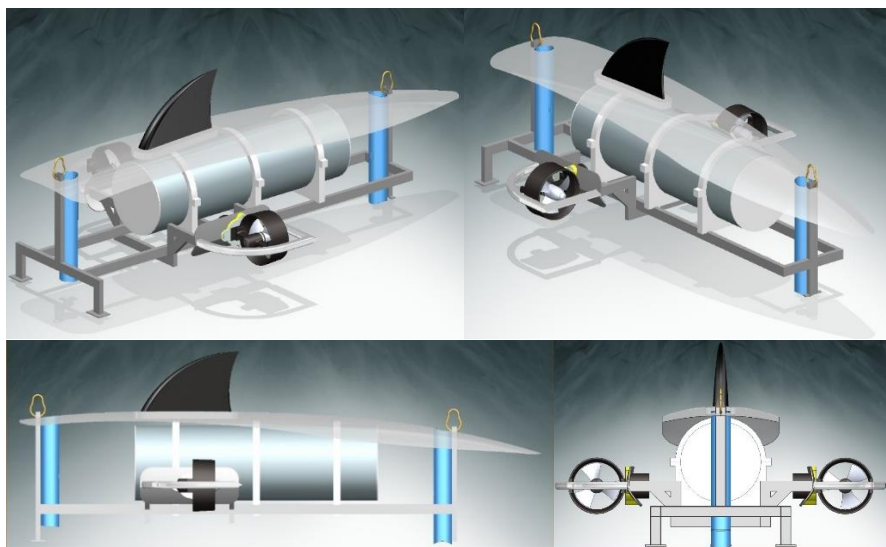


Figura 2-30 Disposición de los propulsores

2.6 SISTEMA DE SENSORIZACIÓN (ubicación)

Para el sistema de sensorización se ha dispuesto el uso de un sonar (Tritech Micron DST), dos cámaras CCD subacuáticas (Shark Eye 550), una Unidad de Momento de Inercia IMU (por sus siglas en inglés) y un sistema GPS. Estos son los sensores que requeridos para la navegación. En función de los requerimientos de las diferentes misiones que realizará el ORCA 300, es de resaltar que el volumen del AUV estará disponible para la ampliación del sistema de sensorización, aprovechando el “payload” o carga útil en las misiones.

Las actividades para la ubicación del sistema de sensorización están enmarcadas, en presentar una disposición conveniente para el correcto funcionamiento de estos sensores, para no interferir en la adquisición de señales, se hará uso de acetal, por las razones ya mencionadas en numerales anteriores.

2.6.1 Sensor de señal acústica

La sonda de exploración Trittech Micron DST (sonda de tecnología digital) Figura 2-31 es una sonda activa compacta, capaz de trabajar hasta 750 metros de profundidad, con una resolución de haz vertical de 35° y una resolución de haz horizontal de 3° . Incluye la tecnología CHIRP, que mejora la resolución del rango en comparación con las sondas de escaneo convencionales.



Figura 2-31 Trittech Micron DST

CHIRP (Compressed High Intensity Radar Pulse) es una técnica que se ha utilizado durante varios años en aplicaciones en el agua, principalmente en muchos sistemas usados como radares comerciales y militares. Las técnicas utilizadas para crear un pulso CHIRP electromagnético ahora se han modificado y adaptado a los sistemas de sonar de imagen acústica comerciales.

La 'resolución de alcance' determina efectivamente la capacidad del sonar para identificar objetivos separados. Como se representa en la Figura 2-32, si dos objetivos están separados por menos de 37.5 mm, entonces no se pueden distinguir entre sí por un sonar convencional. El efecto produce un error y el sistema mostrará un solo objetivo grande 'combinado', en lugar de múltiples objetivos más pequeños, y se perderá cualquier detalle fino de la sonda.

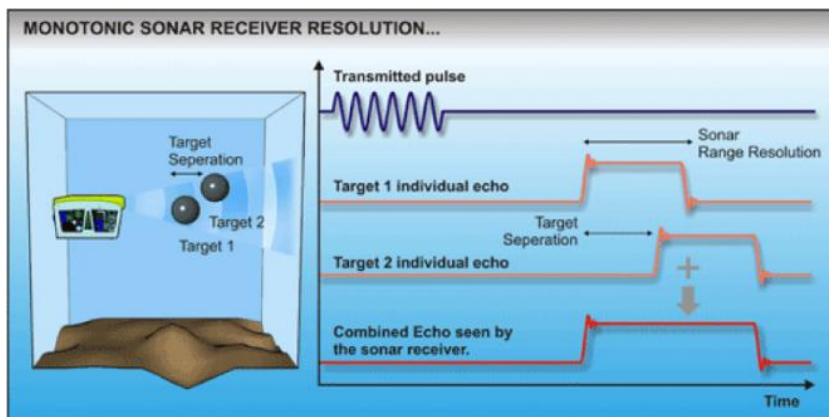


Figura 2-32 Resolución del receptor de sonar monotónica

Con CHIRP, en lugar de usar un pulso de una sola frecuencia portadora como en los sonares convencionales, la frecuencia dentro del pulso cambia haciendo un barrido durante toda la transmisión. Por lo tanto, cuando se superponen dos ecos acústicos, los pulsos no se fusionan en un solo retorno acústico, ya que su frecuencia es diferente entre sí en los puntos superpuestos, y el sonar puede resolver y mostrar los dos objetivos de forma independiente como se explica en *Figura 2-33*.

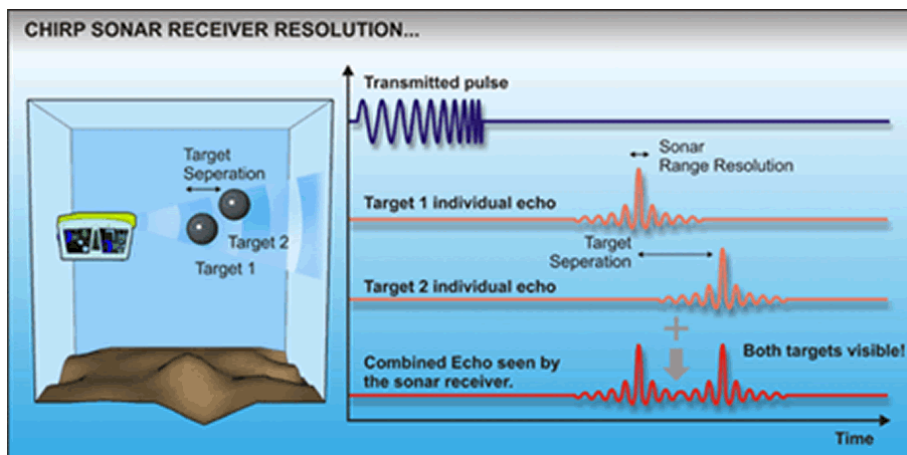


Figura 2-33 Resolución del receptor de sonda CHIRP

Por lo tanto, es posible tener transmisiones más largas y ver objetivos más lejos sin pérdida de resolución. Además, las técnicas de procesamiento de señal CHIRP ofrecen mejoras en el rechazo de ruido de fondo, ya que la sonda solo busca un eco de frecuencia barrido, eliminando ruido aleatorio o ruido fuera de banda.

El sonar se dispondrá como se aprecia en la *Figura 2-34* para combinar la señal del sonar con la de las cámaras.

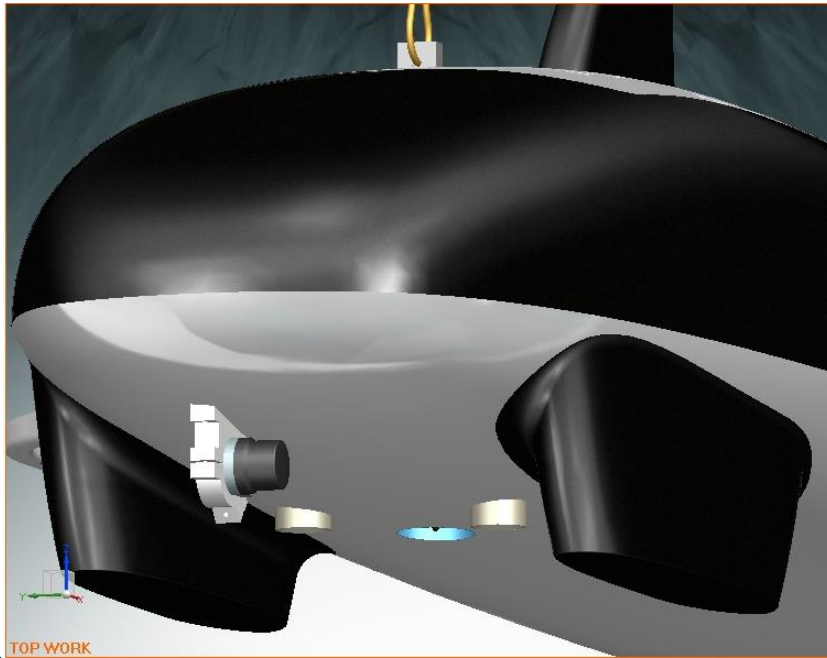


Figura 2-34 Posicionamiento final de los sensores

2.6.2 Sistema de visión

El sistema de visión está compuesto por dos cámaras CCD subacuáticas SharkEye 550 (ver *Figura 2-35*), montados para el procesamiento de imágenes en estéreo. Las cámaras de color analógicas Shark Eye 550 están conectadas, a través de un cable RCA, a los grabadores de cuadros analógicos FALCON respectivos que, al

mismo tiempo, están conectados en las ranuras PCI del controlador principal.



Figura 2-35 Cámara SharkEye 550

Para tener vision en estereo se van a usar dos camara dispuestas como se muestran en la *Figura 2-36*.

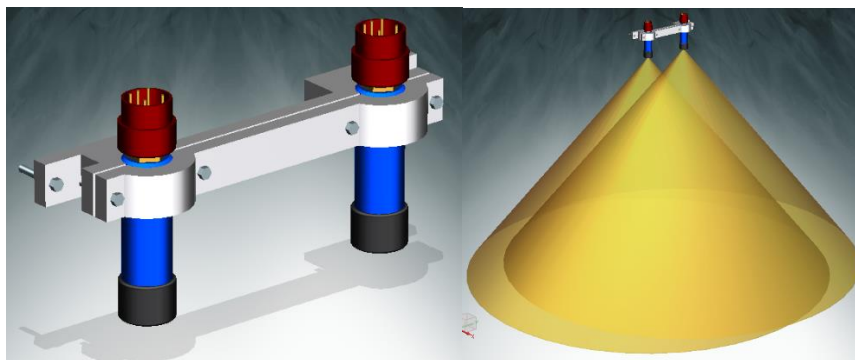


Figura 2-36 Posicionamiento del sistema de visión

2.6.3 Unidad de medición inercia

La unidad de medición inercia IMU (por sus siglas en inglés) es un dispositivo que permite la medición del movimiento, cuenta con una salida digital en serie que entrega una medición de la aceleración en tres dimensiones, adicionalmente esto le permite calcular la velocidad de giro, también en tres dimensiones, por otra parte puede determinar el campo magnético de la tierra. Este dispositivo se controla a través de la interfaz serial RS232. En la *Figura 2-37* se puede apreciar.



Figura 2-37 Xsens MT9 IMU

2.6.4 GPS

Para complementar el sistema de navegación se puede usar un GPS sumergible. Un ejemplo de antena GPS sumergible es el AD 450 de Nautilus Marine Service GmbH. En la *Figura 2-38* se puede apreciar este dispositivo.



Figura 2-38 GPS sumergible es el AD 450

La ganancia viene preestablecida de fábrica en el rango de 30 a 48dB para adaptarse al receptor GPS con el que se va a usar. El rango de voltaje de suministro es de 4.85 a 20 voltios. La cifra de ruido en banda de la combinación amplificador / filtro es <3dB.

2.7 DISEÑO DEFINITIVO

A lo largo del capítulo 2 se desarrollaron los diferentes aspectos para consolidar el diseño definitivo del AUV. Ha sido nombrado el ORCA300 dada su similitud con el cetáceo. A continuación, en la *Figura 2-39* algunas imágenes representativas.

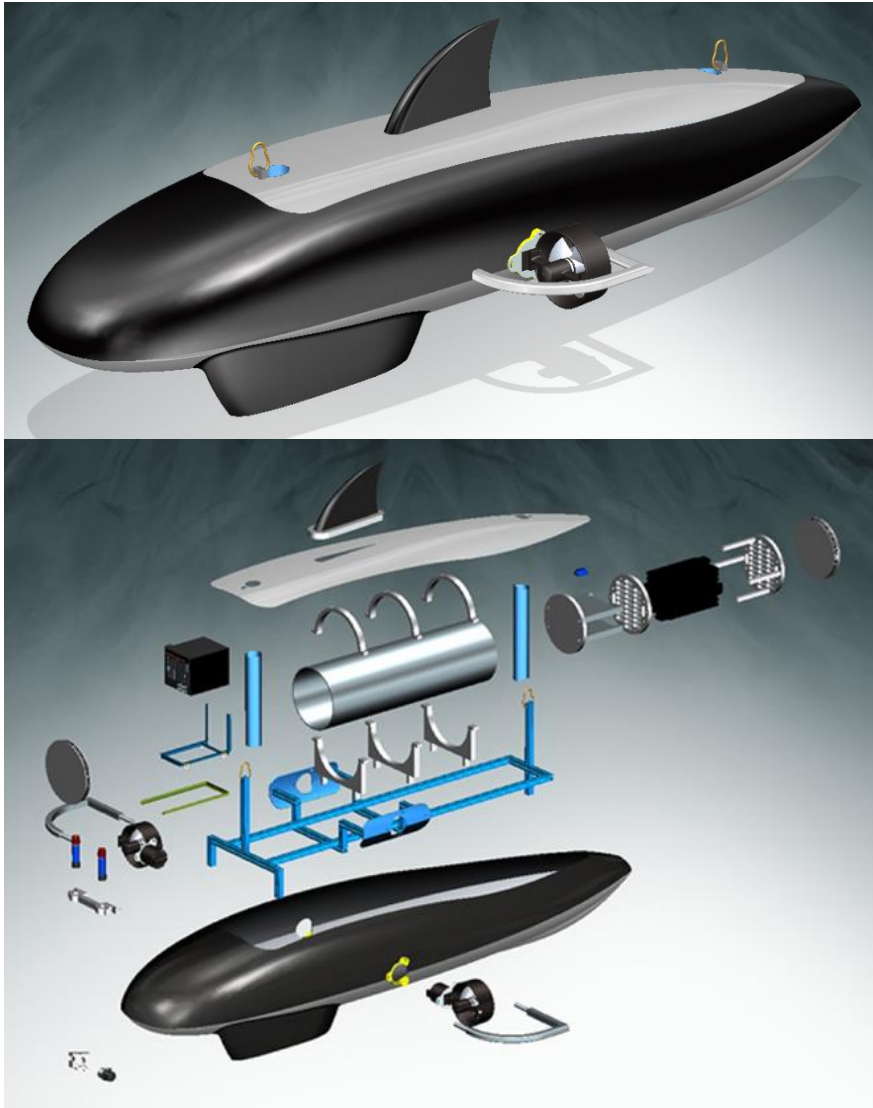


Figura 2-39 Diseño definitivo

Capítulo 3

Fabricación del AUV

3 Fabricación del AUV

El resultado del capítulo 2 Diseño mecánico del AUV, entregó las condiciones finales para la fabricación del AUV de este proyecto, teniendo en cuenta esto, en este capítulo se presenta el planteamiento de la selección de los materiales que se usaron y las actividades propias del proceso de fabricación, el cual estuvo a cargo de los Talleres Xuquer, S.L., una empresa de la comunidad valenciana especialista en la fabricación con materiales compuestos.

3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES Y MÉTODO DE FABRICACIÓN

En el estado del arte se definió que para fabricar formas hidrodinámicas se implementaba fibra de vidrio, por tal razón es el material que se implementó para la construcción del casco hidrodinámico, además la fibra de vidrio debido a las resinas utilizadas en su fabricación, presenta una buena resistencia a la corrosión en medio marinos, razón por la cual gran parte de los barcos son fabricados con este material. El método de fabricación que se usó fue el de laminado con molde abierto y aplicación manual.

En el diseño del casco hidrostático se determinó que se usaría aluminio 6063, la forma que tendrá ese casco será cilíndrica, razón por la cual se utilizará un tubo de 312 mm diámetro externo y 4,58 mm de espesor de pared; se realizará un proceso de anodizado para mejorar la resistencia a la corrosión, para el sistema de cierre se diseñaron unas tapas tipo tapón las cuales se fabricaron en aluminio 6063 para evitar, que al mezclar materiales se produjera corrosión galvánica.

La estructura que sujeta el casco hidrostático al casco hidrodinámico también se fabricó en aluminio, dadas sus propiedades mecánicas, además por su bajo peso y la resistencia a la corrosión la cual se verá mejorada pues también será anodizada.

Los soportes tanto del casco hidrostático como de los sensores se construyeron de acetal, material polimérico que presenta buen comportamiento en ambientes corrosivos como el agua de mar, además cuenta con un peso específico reducido y no absorbe humedad. Por otra parte, es fácil de maquinar permitiendo fabricar fácilmente con él.

3.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DE MOLDES

Para el casco externo fue necesario construir los moldes que posteriormente se usarían para el proceso de laminado con molde abierto. Este proceso tiene 3 etapas, diseño del molde, simulación del mecanizado y generación del código de mecanizado, en *Figura 3-1* se presenta el proceso.

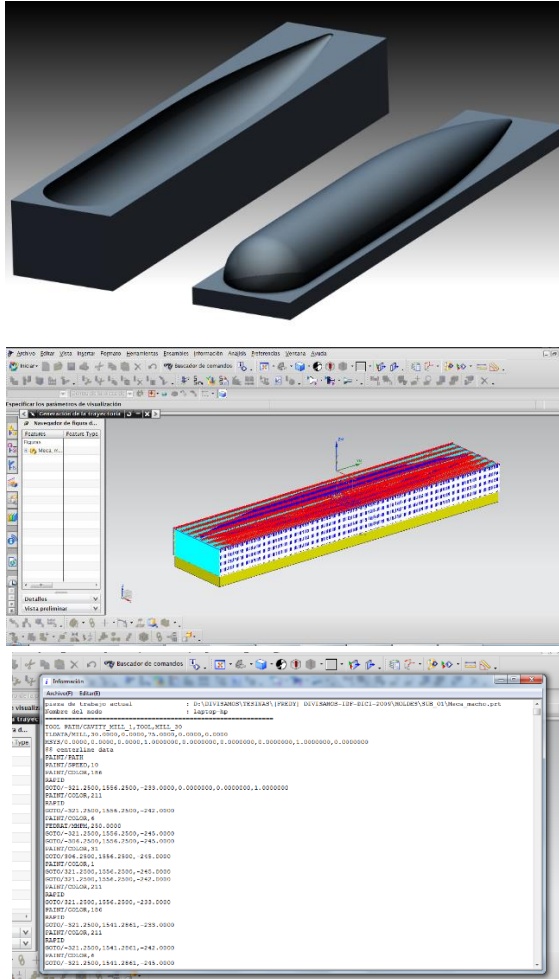


Figura 3-1 Representación de fabricación de moldes

La simulación de los procesos de mecanizado permite verificar, que la operación se realizará sin ningún inconveniente. En el numeral 3.3 ACTIVIDADES DE FABRICACIÓN se presentan los resultados obtenidos.

3.3 ACTIVIDADES DE FABRICACIÓN

- **Fabricación Casco externo**

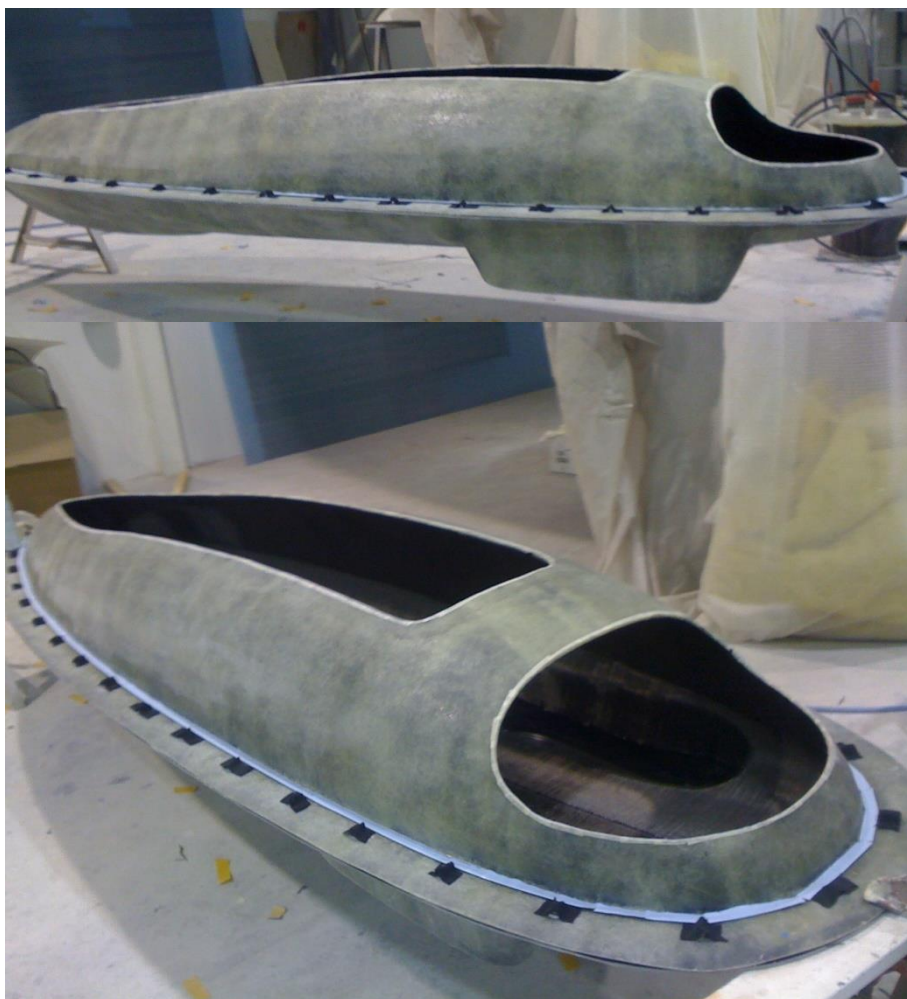


Figura 3-2 Fabricación de Molde



Figura 3-3 Proceso de lamino con molde abierto



Figura 3-4 Casco hidrodinámico fabricado

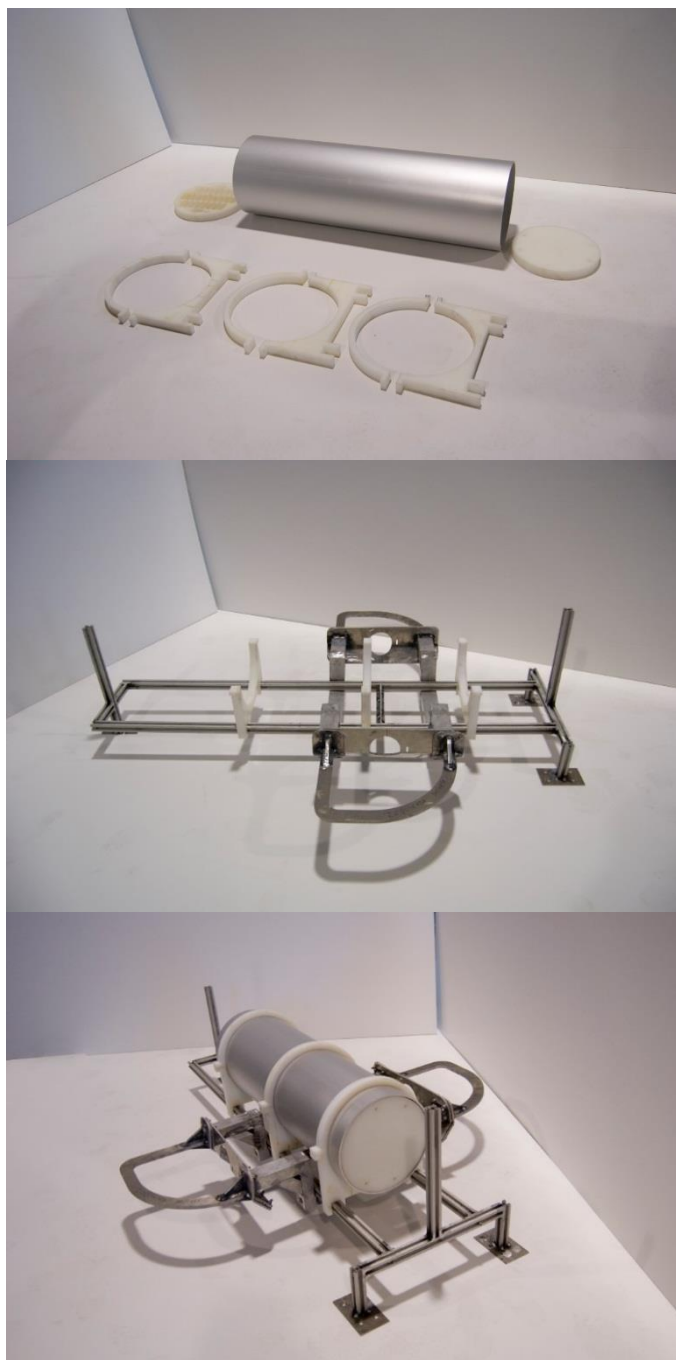


Figura 3-5 Construcción casco hidrostático



Figura 3-6 ORCA 300

Capítulo 4

Modelado dinámico cinemático

4 Modelado dinámico cinemático

El modelado matemático de fenómenos físicos es un área ampliamente investigada, para los AUV resulta de gran ayuda ya que al no tener ninguna conexión física, depende de un sistema de navegación inercial, que funciona basado en las mediciones de los instrumentos y los sistemas de referencia.

Una de las técnicas básicas e implementadas en el modelo matemático de los brazos robot, son las matrices de transformación, dichos modelos han sido considerablemente desarrollados, teniendo la particularidad de permitir agregar elementos al modelo inicial, continuando con la misma formulación, es el caso de los AUV que cuentan con brazos robot.

Como ya se mencionó, algunos AUV incorporan dentro de sus diseños los brazos robot, normalmente en estos casos el modelo matemático se divide en dos partes, una que corresponde al AUV y la otra que corresponde al brazo robot, convirtiéndose esto en una mezcla poco recomendada.

4.1 PLANTEAMIENTO DEL MODELADO DEL AUV

Desarrollar un vehículo robótico autónomo, es clave en la explotación de los recursos marinos. Un modelo dinámico preciso es importante tanto para el diseño del controlador, como para la simulación de una misión, independientemente de la estrategia de control empleada. En este capítulo se desarrolla el modelo dinámico para el ORCA300. El modelo desarrollado incluye fuerzas hidrodinámicas como masa añadida, perfil de arrastre, aceleración de fluidos y flotabilidad. El modelo planteado puede utilizarse en esquemas de control basados en modelos modernos.

Para modelar un brazo robot, se considera un sistema de coordenadas fijo en la base (e) y uno ubicado en cada uno de los elementos que componen el brazo (b). Por otra parte para modelar un AUV también se deben considerar dos sistemas de referencia, uno en la posición inicial (base) y el otro en el casco del AUV (elemento) en la *Figura 4-1* se presenta gráficamente lo expuesto.

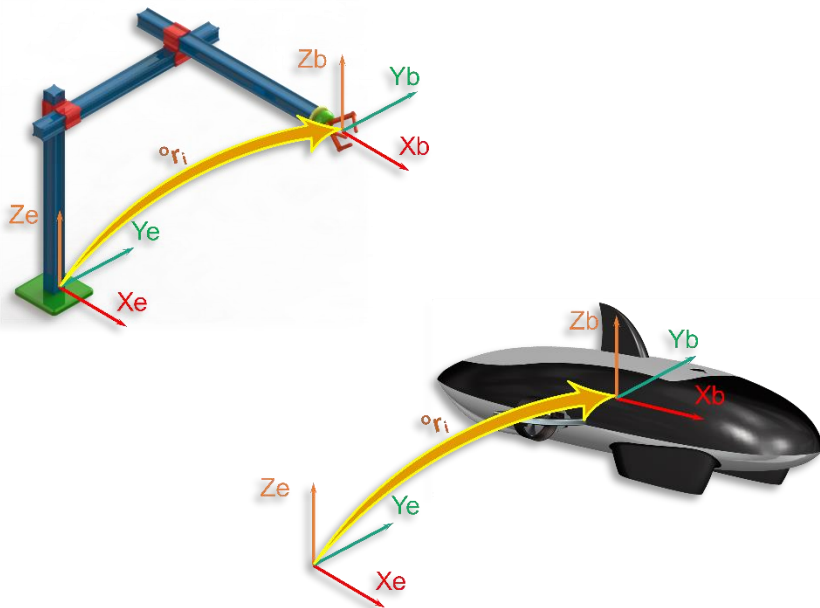


Figura 4-1 Sistemas de referencia

Teniendo en cuenta el alcance y la versatilidad del modelado usado en un brazo robot, se realizaron las adaptaciones y ajustes necesarios para modelar el comportamiento de un AUV, con matrices de transformación y formulación de Lagrange – Euler; con este modelo matricial es posible considerar fenómenos cinemáticos y dinámicos en tres dimensiones.

Adicionalmente para realizar el modelado dinámico y cinemático, se consideró que el AUV cuenta con seis grados de libertad, característica con la se puede hacer una semejanza con un brazo robot de igual número de grados de libertad, encontrando así, que el comportamiento de los dos se puede describir de forma similar.

En la *Figura 4-1* se mostró la similitud que se aprovechó para modelar el comportamiento del AUV. Este brazo robot, tiene seis grados de libertad donde las 3 primeras articulaciones son prismáticas y las 3 últimas están ubicadas en mismo punto y son de rotación; de esta forma

con las 3 primeras articulaciones se controlarán los desplazamientos o movimientos lineales, cada una corresponde a un eje (X, Y, Z), y con las 3 últimas se controlarán las rotaciones o giros, todo esto con respecto a un eje de referencia fijo en tierra (e).

Tal como se planteó las tres primeras articulaciones tendrán el mismo funcionamiento de un robot cartesiano, además para realizar los cálculos estos tres elementos del brazo robot, se considera que no tiene masa, por otra parte, pueden desplazarse indefinidamente pues teóricamente se extienden sin ninguna limitación, esto permitirá que se asemeje a las condiciones de desplazamiento del AUV; todo eso elimina así los efectos sobre los tres últimos elementos, en cuanto a la masa del AUV, se situó en el último elemento coincidiendo el centro de masa con el extremo libre del manipulador.

Cuando se habla del volumen de trabajo de un brazo robot, se debe hacer referencia a las limitantes que determinan la geometría del mismo, este volumen describe el alcance máximo del brazo tomado desde la base hasta el extremo libre del manipulador, estimando un avance longitudinal, otro avance vertical y los giros que la base o las articulaciones le permiten. Para el caso del AUV, se planteó que el volumen de trabajo será infinito, ya que los elementos que determinan los desplazamientos no tienen una longitud definida, en otras palabras no están limitados por sus dimensiones físicas ya que no existen, adicionalmente el desplazamiento de los elementos está planteado de forma tal, que puede darse el caso que el sistema de coordenadas de la base y el sistema de coordenadas situado en el AUV, pueden coincidir en un mismo punto, esto hace que se puedan tener giros sobre un eje de rotación coincidente con el sistema de coordenadas de la base.

Una vez consolidado el modelado del AUV, fue implementado con éxito, se usaron matrices de transformación, el principal objetivo fue determinar la influencia que puede generar una corriente marina, impactando sobre el casco del AUV. Para abarcar toda la superficie del

casco, se hizo una combinación de ángulos teniendo en cuenta la configuración de los ángulos de Euler.

4.1.1 Aspectos físicos para el modelo dinámico y cinemático

Para la realización de este estudio se define el AUV como un sólido rígido, donde todos los puntos materiales mantienen una distancia relativa constante entre ellos, queriendo decir con esto que NO se deforma debido a la fuerza generada por la corriente marina, suponiendo entonces que esta fuerza solo interviene en el desplazamiento del AUV. Adicionalmente se tuvieron en cuenta las leyes físicas que rigen el comportamiento de un AUV. Para la investigación realizada se usó un casco el casco del 3 Fabricación del AUV.

Para comenzar el estudio cinemático se inició consolidando los parámetros geométricos en una matriz numérica que los describe, para posteriormente desarrollar las ecuaciones cinemáticas del movimiento, esto se logró haciendo uso de los parámetros de Denavit-Hartenberg, los mismos que serán desarrollados posteriormente.

4.1.2 Obtención de los parámetros de Denavit – Hartenberg

El método de Denavit – Hartenberg es usado para describir la relación entre la traslación y la rotación de los diferentes elementos, que componen un robot, este es un método matricial que de una forma metódica ubica un sistema de coordenadas en cada elemento (unido al elemento), que compone el robot. La matriz resultante es una matriz de transformación homogénea 4×4 , que representa la relación de cada uno de los sistemas de coordenadas de los elementos, con respecto al sistema del elemento previo.

Con la matriz de transformación homogénea de 4×4 , constituida con la aplicación del método de Denavit – Hartenberg al AUV, fue posible determinar la posición y orientación del AUV, por medio de transformaciones secuenciales y expresado en coordenadas del sistema fijo en tierra, que se establece en el sistema inercial.

La representación de Denavit – Hartenberg de cada elemento depende de 4 parámetros, estos cuatro parámetros describen completamente cualquier articulación; por definición los parámetros son:

θ_i : Es el ángulo de la articulación del eje x_{i-1} al eje x_i respecto del eje z_{i-1} .

d_i : Es la distancia desde el origen del sistema de coordenadas $(i - 1)$ – *ésimo* hasta la intersección del eje z_{i-1} al eje x_i respecto del eje z_{i-1} .

a_i : Es la distancia de separación desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i – *ésimo* a lo largo del eje x_i (o distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i).

α_i : Es el ángulo de separación del eje z_{i-1} al eje z_i respecto del eje x_i . Para esta investigación se han considerado

Las convenciones que se usaron para localizar los ejes de coordenadas de los eslabones se ilustran en la *Figura 4-2*.

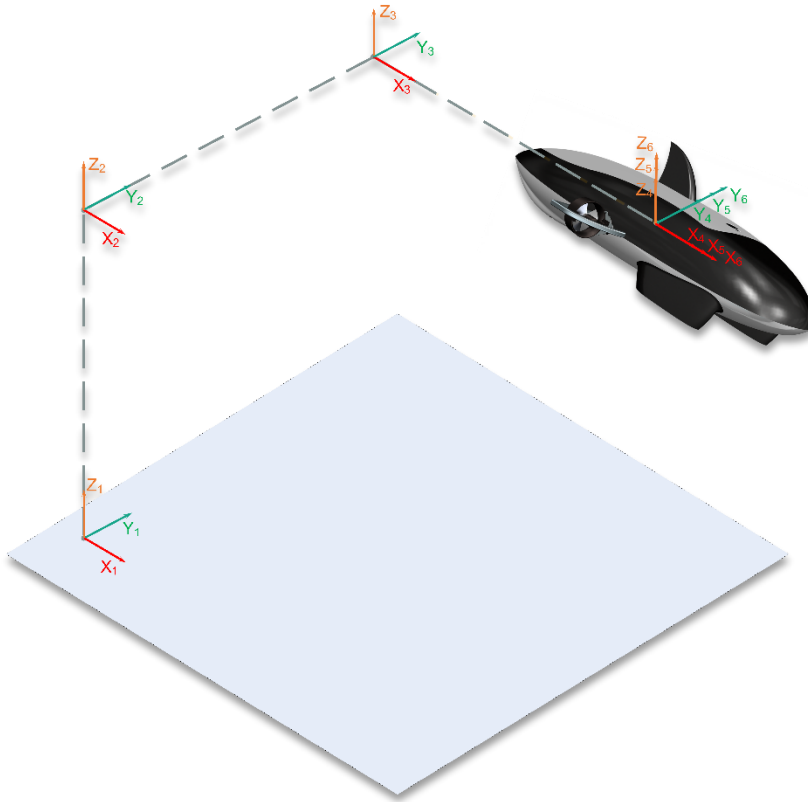


Figura 4-2 Esquema sistemas de coordenadas

- a_1 = Es la distancia de Z0 a Z1 medida a lo largo de X0 igual a 0.
 α_1 = Es el ángulo entre Z0 y Z1 medido sobre X0 igual a 0° .
 d_1 = Es la distancia de X0-1 a X0 medida a lo largo de Z0 igual a 0.
 θ_1 = Es el ángulo entre X0 y X1 medido sobre Z0 y es variable.
- a_2 = Es la distancia de Z1 a Z2 medida a lo largo de X1 igual a 0.
 α_2 = Es el ángulo entre Z1 y Z2 medido sobre X1 igual a 90° .
 d_2 = Es la distancia de X0 a X1 medida a lo largo de Z1 igual a 0.
 θ_2 = Es el ángulo entre X0 y X1 medido sobre Z1 y es variable.
- a_3 = Es la distancia de Z2 a Z3 medida a lo largo de X2 igual a ∞ .
 α_3 = Es el ángulo entre Z2 y Z3 medido sobre X2 igual a 0° .

d_3 = Es la distancia de X1 a X2 medida a lo largo de Z2 igual a 0.

θ_3 = Es el ángulo entre X1 y X2 medido sobre Z2 y es variable.

a_4 = Es la distancia de Z3 a Z4 medida a lo largo de X3 igual a ∞ .

α_4 = Es el ángulo entre Z3 y Z4 medido sobre X3 igual a 0° .

d_4 = Es la distancia de X2 a X3 medida a lo largo de Z3 igual a 0.

θ_4 = Es el ángulo entre X2 y X3 medido sobre Z3 y es variable.

a_5 = Es la distancia de Z4 a Z5 medida a lo largo de X4 igual a 0.

α_5 = Es el ángulo entre Z4 y Z5 medido sobre X4 igual a 90° .

d_5 = Es la distancia de X3 a X4 medida a lo largo de Z4 igual a 0.

θ_5 = Es el ángulo entre X3 y X4 medido sobre Z4 y es variable.

a_6 = Es la distancia de Z5 a Z6 medida a lo largo de X5 igual a 0.

α_6 = Es el ángulo entre Z5 y Z6 medido sobre X5 igual a 0° .

d_6 = Es la distancia de X4 a X5 medida a lo largo de Z5 igual a ∞ .

θ_6 = Es el ángulo entre X4 y X5 medido sobre Z5 y es variable.

En la *Tabla 4-1*, se resumen los parámetros de Denavit-Hartenberg adaptados para el AUV, los cuales describen las medidas geométricas de cada par cinemático. R/P hace referencia al tipo de articulación, si es prismática se asigna el número uno (1), si es de revolución se asigna el número cero (0).

Articulación i	α_i	a_i	θ_i	d_i	R/P	Rango articulación
1	$\pi/2$	0	$-\pi/2$	0	1	$-\infty$ a ∞ metros
2	$\pi/2$	1	$\pi/2$	0	1	$-\infty$ a ∞ metros
3	0	1	$-\pi/2$	0	1	$-\infty$ a ∞ metros
4	$\pi/2$	0	0	1	0	$-\infty$ a ∞ grados
5	$-\pi/2$	0	0	0	0	$-\infty$ a ∞ grados
6	0	0	0	0	0	$-\infty$ a ∞ grados

Tabla 4-1 Elementos, articulaciones y los parámetros de Denavit – Hartenberg

Para las tres últimas articulaciones que son de tipo revolución se reemplazan estas por las letras griegas así: $\theta_4 = \psi$, $\theta_5 = \theta$, $\theta_6 = \phi$

4.1.3 Obtención de las matrices de transformación para el AUV

Para hacer similitud entre un brazo robot y el AUV se tendrán matrices que describirán por una parte los desplazamientos y por otra parte los giros, se tienen entonces las siguientes matrices para representar el desplazamiento de los tres primeros elementos, donde (d_1, d_2, d_3) especificarán las distancia de avance que tendrá el AUV en cada uno de los ejes de avance X, Y, Z, respectivamente.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

0A_1 en un brazo robot correspondería al eslabón 1.

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

1A_2 en un brazo robot correspondería al eslabón 2.

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

2A_3 en un brazo robot correspondería al eslabón 3.

Para las tres articulaciones de revolución se tienen las siguientes matrices, donde la orientación en el eje Z se describe usando la letra griega ψ , la orientación en el eje Y se describe usando la letra griega θ y la orientación en el eje X se describe usando la letra griega ϕ , además $c = \cos$ y $s = \sin$

Orientación en el eje Z

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

3A_4 en un brazo robot correspondería al eslabón 4.

Orientación en el eje Y

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

4A_5 en un brazo robot correspondería al eslabón 5.

Orientación en el eje X

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi & 0 \\ 0 & -s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

5A_6 en un brazo robot correspondería al eslabón 6.

Es importante aclarar que los ángulos NO tienen limitación como sucedería en un brazo robot, pues al estar libre en el AUV girará proporcionalmente a las fuerzas que lo afectan

4.1.4 Ecuaciones cinemáticas del AUV

Obtenidas las matrices de transformación de cada uno de los eslabones teóricos que se explicaron en el numeral 4.1.1, se hará una relación para obtener la matriz de transformación del AUV, esta matriz especifica la orientación y posición del AUV con respecto al eje de referencia, resultado de la multiplicación de las matrices de transformación en orden ascendente. La matriz de transformación estará dada por:

$${}^0T_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \quad (4.7)$$

Desarrollando la ecuación (4.7), se tiene:

$${}^0T_2 = {}^0A_1 {}^1A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_3 = {}^0T_2 {}^2A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_4 = {}^0T_3 {}^3A_4 = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 & d_1 \\ -s\psi & c\psi & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_5 = {}^0T_4 {}^4A_5 = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi & -s\theta c\psi & d_1 \\ -s\psi c\theta & c\psi & s\psi s\theta & d_2 \\ s\theta & 0 & c\theta & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_6 = {}^0T_5 {}^5A_6$$

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi c\phi + s\theta c\psi s\phi & s\psi s\phi - s\theta c\psi c\phi & d_1 \\ -s\psi c\theta & c\psi c\phi - s\psi s\theta s\phi & c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi & d_2 \\ s\theta & -c\phi s\phi & c\theta c\phi & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

La combinación de los desplazamiento en los tres ejes se podrán expresar y determinar multiplicando las matrices planteadas en las ecuaciones (4.1) (4.2) (4.3) que es el resultado de 0T_3 . Además para expresar o determinar la combinación los desplazamientos y la orientación del AUV se plantea la ecuación (4.8).

Las componentes de la matriz de transformación homogénea compuesta del AUV, se presentan de la siguiente manera:

$$T = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Donde:

n : Es el vector normal al AUV

s : Es el vector de desplazamiento del AUV

a : Es el vector de aproximación

p : Es el vector de posición del AUV

Igualando (4.7) y (4.9), se pueden obtener las componentes rectangulares de los vectores orientación y posición, entonces, se definen así las ecuaciones cinemáticas, que controlan los movimientos del AUV.

$$n_x = \cos\psi * \cos\theta \quad (4.10)$$

$$n_y = -\sin\psi * \cos\theta \quad (4.11)$$

$$n_z = \text{sen}\theta \quad (4.12)$$

$$s_x = \text{sen}\psi * \cos\phi + \text{sen}\theta * \cos\psi * \text{sen}\phi \quad (4.13)$$

$$s_y = \cos\psi * \cos\phi - \text{sen}\psi * \text{sen}\theta * \text{sen}\phi \quad (4.14)$$

$$s_z = -\cos\phi * \text{sen}\phi \quad (4.15)$$

$$a_x = \text{sen}\psi * \text{sen}\phi - \text{sen}\theta * \cos\psi * \cos\phi \quad (4.16)$$

$$a_y = \cos\psi * \text{sen}\phi + \text{sen}\psi * \text{sen}\theta * \cos\phi \quad (4.17)$$

$$a_z = \cos\theta * \cos\phi \quad (4.18)$$

$$p_x = d_1 \quad (4.19)$$

$$p_y = d_2 \quad (4.20)$$

$$p_z = d_3 \quad (4.21)$$

Para controlar los movimientos de AUV y directamente controlar los vectores de posición y orientación del AUV, se usaran las ecuaciones de la (4.10) a la (4.21).

4.1.5 Cinemática directa del AUV

Con la obtención de las ecuaciones cinemáticas para el AUV, se obtiene la cinemática directa de este, para comprobar se darán valores angulares que deberán tener las articulaciones supuestas para el AUV, con esto se conocerá la posición y orientación del AUV.

Se sustituyeron las magnitudes de los parámetros de Denavit-Hartenberg para calcular la cinemática directa, entonces se tiene que $\psi = \frac{\pi}{2} rad, \theta = -\frac{\pi}{2} rad, \phi = 0 rad$.

$$n_x = \cos \frac{\pi}{2} * \cos -\frac{\pi}{2} = 0$$

$$n_y = -\text{sen} \frac{\pi}{2} * \cos -\frac{\pi}{2} = 0$$

$$n_z = \text{sen} -\frac{\pi}{2} = -1$$

$$s_x = \operatorname{sen} \frac{\pi}{2} * \cos 0 + \operatorname{sen} -\frac{\pi}{2} * \cos \frac{\pi}{2} * \operatorname{sen} 0 = 1$$

$$s_y = \cos \frac{\pi}{2} * \cos 0 - \operatorname{sen} \frac{\pi}{2} * \operatorname{sen} -\frac{\pi}{2} * \operatorname{sen} 0 = 0$$

$$s_z = -\cos 0 * \operatorname{sen} 0 = 0$$

$$a_x = \operatorname{sen} \frac{\pi}{2} * \operatorname{sen} 0 - \operatorname{sen} -\frac{\pi}{2} * \cos \frac{\pi}{2} * \cos 0 = 0$$

$$a_y = \cos \frac{\pi}{2} * \operatorname{sen} 0 + \operatorname{sen} \frac{\pi}{2} * \operatorname{sen} -\frac{\pi}{2} * \cos 0 = -1$$

$$a_z = \cos -\frac{\pi}{2} * \cos 0 = 0$$

$$p_x = 0$$

$$p_y = 0$$

$$p_z = 0$$

Los resultados de las ecuaciones anteriores corresponden a la posición inicial, matricialmente reemplazando en (4.9).

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Esto da prueba que han sido correctamente planteadas las ecuaciones cinemáticas.

4.1.6 Cinemática inversa del AUV

La cinemática inversa permite la solución de las coordenadas generalizadas, este procedimiento consiste en encontrar los ángulos que debe tener el AUV para alcanzar una posición específica. Para hacer una comprobación se plantea una trayectoria que está compuesta por unas coordenadas X, Y, Z. Matricialmente se identifica la posición a continuación; esta matriz contiene las magnitudes a las que se evaluarán y calcularán los ángulos que deben tener las articulaciones, por lo que se iguala a la matriz T del AUV, ya que estos los valores que deberán tener los vectores que la conforman.

$$TG = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 100 \\ 0 & 1 & 0 & 200 \\ 0 & 0 & 1 & 200 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Al igualar T con los valores numéricos de TG se tiene:

$$1 = \cos\psi * \cos\theta$$

$$0 = -\sin\psi * \cos\theta$$

$$0 = \text{sen}\theta$$

$$0 = \text{sen}\psi * \cos\phi + \text{sen}\theta * \cos\psi * \text{sen}\phi$$

$$1 = \cos\psi * \cos\phi - \text{sen}\psi * \text{sen}\theta * \text{sen}\phi$$

$$0 = -\cos\phi * \text{sen}\phi$$

$$0 = \text{sen}\psi * \text{sen}\phi - \text{sen}\theta * \cos\psi * \cos\phi$$

$$0 = \cos\psi * \text{sen}\phi + \text{sen}\psi * \text{sen}\theta * \cos\phi$$

$$1 = \cos\theta * \cos\phi$$

$$100 = p_x$$

$$200 = p_y$$

$$200 = p_z$$

Para que se implemente el método de Newton Raphson el cual para iniciar las iteraciones pide valores iniciales, estos se asignan arbitrariamente, por lo que se tiene:

$$\psi = 1, \theta = 1, \phi = 1.$$

Sustituyendo los valores iniciales en las ecuaciones se tiene:

$$\cos\psi * \cos\theta = 1$$

$$-\text{sen}\psi * \cos\theta = -0.017$$

$$\text{sen}\theta = 0.017$$

$$\text{sen}1 * \cos1 + \text{sen}1 * \cos1 * \text{sen}1 = 0.052$$

$$\cos\psi * \cos\phi - \text{sen}\psi * \text{sen}\theta * \text{sen}\phi = 1$$

$$-\cos\phi * \text{sen}\phi = -0.017$$

$$\text{sen}\psi * \text{sen}\phi - \text{sen}\theta * \cos\psi * \cos\phi = -0.017$$

$$\cos\psi * \text{sen}\phi + \text{sen}\psi * \text{sen}\theta * \cos\phi = 0.018$$

$$\cos\theta * \cos\phi = 1$$

$$100 = p_x$$

$$200 = p_y$$

$$200 = p_z$$

Si los resultados obtenidos se presentan de forma matricial se tiene:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0.052 & -0.017 & 100 \\ -0.017 & 1 & 0.018 & 200 \\ 0.017 & -0.017 & 1 & 200 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para determinar la magnitud de la distancia entre ambos puntos, se deben restar las coordenadas de traslación, entonces la distancia entre ambos puntos estará dada por en la matriz que se presenta a continuación:

$$\text{dist} = \left[\frac{1}{2}(n_{TG} \times n_T) + \frac{1}{2}(s_{TG} \times s_T) + \frac{1}{2}(a_{TG} \times a_T) \right] \quad (4.22)$$

$$dist = \begin{bmatrix} P_{TG_x} - P_{T_x} \\ P_{TG_y} - P_{T_y} \\ P_{TG_z} - P_{T_z} \\ \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} n_{TG_x} \times n_{T_x} \\ n_{TG_y} \times n_{T_y} \\ n_{TG_z} \times n_{T_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_{TG_x} \times s_{T_x} \\ s_{TG_y} \times s_{T_y} \\ s_{TG_z} \times s_{T_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{TG_x} \times a_{T_x} \\ a_{TG_y} \times a_{T_y} \\ a_{TG_z} \times a_{T_z} \end{bmatrix} \right) \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Sustituyendo valores se tiene que:

$$dist = \begin{bmatrix} 100 - (-100) \\ 200 - (-200) \\ 200 - (-200) \\ \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} 1 \times 1 \\ 0 \times -0.017 \\ 0 \times 0.017 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \times 0.052 \\ 1 \times 1 \\ 0 \times -0.017 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \times -0.017 \\ 0 \times 0.018 \\ 1 \times 1 \end{bmatrix} \right) \end{bmatrix}$$

$$dist = \begin{bmatrix} 200 \\ 400 \\ 400 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

4.1.7 Cálculo de la velocidad del AUV

El cálculo de la velocidad a la cual se moverá el AUV corresponde a la velocidad a la cual se moverían las articulaciones del robot que se asemeja al modelo del AUV, por tal razón las velocidades lineales y velocidades angulares corresponderán a las velocidades de desplazamiento y velocidades de rotación. Este cálculo no reviste mucha complejidad ya que resulta ser un sistema lineal en el extremo libre del manipulador que es el punto en el que se asume que está el AUV. Este sistema se obtiene al derivar las ecuaciones de la (4.10) a la (4.21), las

ecuaciones resultantes permitirán controlar la velocidad. A continuación, se describen los resultados:

$$\dot{n}_x = -\cos(\theta)\sin(\psi)\dot{\psi} - \cos(\psi)\sin(\theta)\dot{\theta} \quad (4.24)$$

$$\dot{n}_y = \sin(\psi)\sin(\theta)\dot{\theta} - \cos(\psi)\dot{\psi}\cos(\theta) \quad (4.25)$$

$$\dot{n}_z = \cos(\theta)\dot{\theta} \quad (4.26)$$

$$\dot{s}_x = \cos(\phi)\cos(\psi)\dot{\psi} - \sin(\phi)\dot{\phi}\sin(\psi) + \cos(\psi)\sin(\theta)\cos(\phi)\dot{\phi} - \cos(\psi)\dot{\psi}\cos(\theta)\dot{\theta}\sin(\phi) - \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) \quad (4.27)$$

$$\dot{s}_y = -\cos(\psi)\sin(\phi)\dot{\phi} - \cos(\phi)\sin(\psi)\dot{\psi} - \cos(\phi)\dot{\phi}\sin(\psi)\sin(\theta) - \cos(\psi)\dot{\psi}\sin(\phi)\sin(\theta) - \cos(\theta)\dot{\theta}\sin(\phi)\sin(\psi) \quad (4.28)$$

$$\dot{s}_z = \sin(\phi)\sin(\theta)\dot{\theta} - \cos(\phi)\dot{\phi}\cos(\theta) \quad (4.29)$$

$$\dot{a}_x = \cos(\phi)\dot{\phi}\sin(\psi) + \cos(\psi)\dot{\psi}\sin(\phi) + \cos(\psi)\sin(\phi)\dot{\phi}\sin(\theta) + \cos(\phi)\sin(\psi)\dot{\psi}\sin(\theta) - \cos(\phi)\cos(\psi)\cos(\theta)\dot{\theta} \quad (4.30)$$

$$\dot{a}_y = \cos(\phi)\dot{\phi}\cos(\psi) - \sin(\phi)\sin(\psi)\dot{\psi} + \cos(\phi)\cos(\psi)\dot{\psi}\sin(\theta) + \cos(\phi)\cos(\theta)\dot{\theta}\sin(\psi) - \sin(\phi)\dot{\phi}\sin(\psi)\sin(\theta) \quad (4.31)$$

$$\dot{a}_z = -\cos(\theta)\sin(\phi)\dot{\phi} - \cos(\phi)\sin(\theta)\dot{\theta} \quad (4.32)$$

$$\dot{p}_x = \dot{d}_1 \quad (4.33)$$

$$\dot{p}_y = \dot{d}_2 \quad (4.34)$$

$$\dot{p}_z = \dot{d}_3 \quad (4.35)$$

Con las 12 ecuaciones de (4.24) a (4.35) se tiene 6 incógnitas que corresponden a las velocidades de las articulaciones, para operar y resolver se plantea la ecuación (4.36)

$$R \cdot art = B \quad (4.36)$$

Donde:

R: Ecuaciones de (4.24) a (4.35)

art: Vector de incógnitas -velocidades-

B: Datos resultantes

4.1.8 Cálculo de la aceleración del AUV

El cálculo de la aceleración que tendrá el AUV en su desplazamiento se hará de forma análoga al cálculo de las velocidades desarrollado en el numeral 4.1.7 Cálculo de la velocidad del AUV, por tal razón las aceleraciones lineales corresponderán a las aceleraciones de desplazamiento y aceleraciones angulares corresponderán a las aceleraciones de rotación. Este cálculo no es complejo ya que es un sistema lineal para el extremo libre del manipulador que es el punto en el que se asume que está el AUV. Este sistema se obtiene al derivar las ecuaciones de la (4.37) a la (4.48), las ecuaciones resultantes permitirán controlar la velocidad. A continuación, se describen los resultados:

$$\ddot{n}_x = 2 \sin(\psi) \dot{\psi} \sin(\theta) \dot{\theta}^2 - \cos(\psi) \cos(\theta) \dot{\theta} - \cos(\theta) \sin(\psi) \ddot{\psi} - \cos(\psi) \sin(\theta) \ddot{\theta} - \cos(\psi) \dot{\psi}^2 \cos(\theta) \quad (4.37)$$

$$\ddot{n}_y = \cos(\theta) \sin(\psi) \dot{\psi}^2 + \cos(\theta) \dot{\theta}^2 \sin(\psi) - \cos(\psi) \ddot{\psi} \cos(\theta) + \sin(\psi) \sin(\theta) \ddot{\theta} + 2 \cos(\psi) \dot{\psi} \sin(\theta) \dot{\theta} \quad (4.38)$$

$$\ddot{n}_z = \cos(\theta) \ddot{\theta} - \sin(\theta) \dot{\theta}^2 \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned} \ddot{s}_x = & \cos(\phi) \cos(\psi) \ddot{\psi} - \cos(\phi) \sin(\psi) \dot{\psi}^2 - \cos(\phi) \dot{\phi}^2 \sin(\psi) \\ & - \sin(\phi) \ddot{\phi} \sin(\psi) - \cos(\psi) \sin(\phi) \ddot{\phi}^2 \sin(\theta) \\ & - \cos(\psi) \dot{\psi}^2 \sin(\phi) \sin(\theta) - 2 \cos(\psi) \dot{\psi}^2 \sin(\phi) \dot{\phi} \\ & - \cos(\psi) \sin(\phi) \sin(\theta) \dot{\theta}^2 + \cos(\phi) \ddot{\phi} \cos(\psi) \sin(\theta) \\ & + \cos(\psi) \cos(\theta) \ddot{\theta} \sin(\phi) - \sin(\phi) \sin(\psi) \ddot{\psi} \sin(\theta) \\ & + 2 \cos(\phi) \dot{\phi} \cos(\psi) \cos(\theta) - 2 \cos(\phi) \dot{\phi} \sin(\psi) \dot{\psi} \sin(\theta) \\ & - 2 \cos(\theta) \dot{\theta} \sin(\phi) \sin(\psi) \dot{\psi} \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} \ddot{s}_y = & \sin(\phi) \dot{\phi}^2 \sin(\psi) \sin(\theta) - \cos(\phi) \cos(\psi) \dot{\psi}^2 \\ & - \cos(\psi) \sin(\phi) \ddot{\phi} - \cos(\phi) \sin(\psi) - \cos(\phi) \dot{\phi}^2 \cos(\psi) \\ & + \sin(\phi) \sin(\psi) \dot{\psi}^2 \sin(\theta) + 2 \sin(\phi) \dot{\phi} \sin(\psi) \dot{\psi} \\ & + \sin(\phi) \sin(\psi) \sin(\theta) \dot{\theta}^2 - \cos(\phi) \ddot{\phi} \sin(\psi) \sin(\theta) \\ & - \cos(\psi) \ddot{\psi} \sin(\phi) \sin(\theta) - \cos(\theta) \ddot{\theta} \sin(\phi) \sin(\psi) \end{aligned} \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned} & -2\cos(\phi)\dot{\phi}\cos(\psi)\dot{\psi}\sin(\theta) - 2\cos(\phi)\dot{\phi}\cos(\theta)\dot{\theta}\sin(\psi) \\ & -2\cos(\psi)\dot{\psi}\cos(\theta)\dot{\theta}\sin(\phi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{s}_z = & \cos(\theta)\sin(\phi)\dot{\phi}^2 + \cos(\theta)\dot{\theta}^2\sin(\phi) - \cos(\phi)\ddot{\phi}\cos(\theta) \\ & + \sin(\phi)\sin(\theta)\ddot{\theta} + 2\cos(\phi)\dot{\phi}\sin(\theta)\dot{\theta} \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} \ddot{a}_x = & \cos(\phi)\ddot{\phi}\sin(\psi) - \sin(\phi)\sin(\psi)\dot{\psi}^2 - \sin(\phi)\dot{\phi}^2\sin(\psi) \\ & + \cos(\psi)\ddot{\psi}\sin(\phi) + \cos(\phi)\dot{\phi}^2\cos(\psi)\sin(\theta) \\ & + \cos(\phi)\cos(\psi)\dot{\psi}^2\sin(\theta) + 2\cos(\phi)\dot{\phi}\cos(\psi)\dot{\psi} \\ & + \cos(\phi)\cos(\psi)\sin(\theta)\dot{\theta}^2 - \cos(\phi)\cos(\psi)\cos(\theta)\ddot{\theta} \\ & + \cos(\psi)\sin(\phi)\ddot{\phi}\sin(\theta) + \cos(\phi)\sin(\psi)\ddot{\psi}\sin(\theta) \\ & + 2\cos(\psi)\cos(\theta)\dot{\theta}\sin(\phi)\dot{\phi} + 2\cos(\phi)\cos(\theta)\dot{\theta}\sin(\psi)\dot{\psi} \\ & - 2\sin(\phi)\dot{\phi}\sin(\psi)\dot{\psi}\sin(\theta) \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$\begin{aligned} \ddot{a}_y = & \cos(\phi)\ddot{\phi}\cos(\psi) - \cos(\psi)\dot{\psi}^2\sin(\phi) - \cos(\psi)\sin(\phi)\dot{\phi}^2 \\ & - \sin(\phi)\sin(\psi)\ddot{\psi} - \cos(\phi)\dot{\phi}^2\sin(\psi)\sin(\theta) \\ & - \cos(\phi)\sin(\psi)\dot{\psi}^2\sin(\theta) - 2\cos(\phi)\dot{\phi}\sin(\psi)\dot{\psi} \\ & - \cos(\phi)\sin(\psi)\sin(\theta)\dot{\theta}^2 + \cos(\phi)\cos(\psi)\ddot{\psi}\sin\theta \\ & + \cos(\phi)\cos(\theta)\ddot{\theta}\sin(\psi) - \sin(\phi)\ddot{\phi}\sin(\psi)\sin(\theta) \\ & + 2\cos(\phi)\cos(\psi)\dot{\psi}\cos(\theta)\dot{\theta} - 2\cos(\psi)\dot{\psi}\sin(\phi)\dot{\phi}\sin(\theta) \\ & - 2\cos(\theta)\dot{\theta}\sin(\phi)\dot{\phi}\sin(\psi) \end{aligned} \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned} \ddot{a}_z = & 2\sin(\phi)\dot{\phi}\sin(\theta)\dot{\theta} - \cos(\phi)\cos(\theta)\dot{\theta}^2 - \cos(\theta)\sin(\phi)\ddot{\phi} \\ & - \cos(\phi)\sin(\theta)\ddot{\theta} - \cos(\phi)\dot{\phi}^2\cos(\theta) \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\ddot{p}_x = \ddot{d}_1 \quad (4.46)$$

$$\ddot{p}_y = \ddot{d}_2 \quad (4.47)$$

$$\ddot{p}_z = \ddot{d}_3 \quad (4.48)$$

Con las 12 ecuaciones de (4.38) a (4.48) se tiene 6 incógnitas que corresponden a las velocidades de las articulaciones, para operar y resolver se plantea la ecuación (4.49)

$$\ddot{R} \cdot art = \ddot{B} \quad (4.49)$$

Donde:

\ddot{R} : Ecuaciones de (4.38) a (4.48)

art : Vector de incógnitas -aceleraciones-

\ddot{B} : Datos resultantes

4.1.9 Cálculo de la dinámica del AUV

La rama de la física encargada de estudiar el movimiento es la dinámica, con los resultados de los apartados 4.1.4 Ecuaciones cinemáticas del AUV, 4.1.5 Cinemática directa del AUV y 4.1.6 Cinemática inversa, se cuenta con las ecuaciones necesarias para controlar los parámetros de la cinemática del AUV, estos parámetros son implementados en el cálculo de las fuerzas generalizadas.

La energía total necesaria para que el AUV cambie de posición se puede separar en dos, la energía cinética y la energía potencial. Para desarrollar el cálculo de la energía total es necesario obtener las ecuaciones dinámicas del AUV, estas ecuaciones rigen el comportamiento de las fuerzas generalizadas de las articulaciones que se plantearon en la similitud del AUV con un brazo robot.

Empleando la metodología de Lagrange-Euler se obtendrán las ecuaciones dinámicas para el AUV. Las ecuaciones diferenciales de movimiento proporcionan ecuaciones de estado para la dinámica del manipulador, estas ecuaciones pueden ser utilizadas para diseñar e implementar estrategias de control avanzadas.

La posibilidad de derivar las ecuaciones dinámicas estaba basada en el conocimiento de dos factores: en primer lugar, la matriz de transformación homogénea y en segundo lugar la ecuación de Lagrange-Euler.

La matriz de transformación homogénea A , plantea la relación espacial que existe entre dos sistemas de coordenadas fijado cada uno en un elemento que componen un brazo robot, que para el caso no son reales, de esta forma se relaciona un punto fijo en el elemento i expresado en coordenadas homogéneas con respecto al sistemas de coordenadas $i - 1$ –ésimo, en el sistema de coordenadas $(i - 1)$ –ésimo.

La ecuación de Lagrange-Euler se plantea así:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (4.50)$$

Donde:

L : es la función lagrangiana

$$L = K - P \quad (4.51)$$

K : es la energía cinética

P : es la energía potencial

q_i : es la coordenada generalizada del AUV

\dot{q}_i : es la primer derivada con respecto al tiempo de la coordenada generalizada q_i

τ_i : es la fuerza generalizada aplicada al sistema en la articulación i , para mover el elemento i

4.1.10 Cálculo de la energía cinética del AUV

Con el modelo que se planteó asemejando un brazo robot y con la necesidad de calcular la energía cinética, se hace obligatorio conocer la magnitud de la velocidad de cada elemento, para un brazo robot lo primero que se hace es calcular la velocidad de un punto fijo en el elemento analizado, esto permitirá además determinar cómo afecta los movimientos de las articulaciones a los demás elementos.

Para desarrollar el análisis planteado será necesario teniendo en el reposo el elemento de análisis i y fijar un punto en el, este punto deberá expresarse en coordenadas homogéneas de la base, con respecto al sistema de coordenadas del mismo elemento ${}^i r_i$, además un vector de posición con respecto al sistema de coordenadas de la base ${}^0 r_i$, esta relación es posible gracias a la implementación de las matrices de transformación del AUV, se tiene que:

$${}^0 r_i = {}^0 A_i {}^i r_i \quad (4.52)$$

La derivada del vector posición ${}^0 r_i$ con respecto al tiempo devuelve la velocidad del eslabón respecto al sistema de coordenadas de la base, entonces, la velocidad expresada en el sistema de referencia inercial estará dada por:

$${}^0 v_i \equiv v_i = \frac{d}{dt}({}^0 r_i) = \frac{d}{dt}({}^0 A_i {}^i r_i) = \left(\sum_{j=1}^i \frac{\partial {}^0 A_i}{\partial q_j} \dot{q}_j \right) {}^i r_i \quad (4.53)$$

La derivada parcial de 0A_i con respecto a q_j se puede obtener implementando la matriz Q_i tal como se muestra a continuación.

Q_i Para una articulación prismática sería:

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Q_i Para una articulación de revolución sería:

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Entonces se tiene:

$$\frac{\partial {}^0A_i}{\partial q_j} \dot{q}_j = Q_i {}^0A_i \quad (4.56)$$

Con el fin de simplificar las notaciones, se define $U_{ij} \triangleq \partial {}^0A_i / \partial q_j$, entonces la ecuación se puede escribir como: para $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$

$$U_{ij} = \begin{cases} {}^0A_{i-1} Q_j^{j-1} A_i & \text{para } j \leq i \\ 0 & \text{para } j > i \end{cases} \quad (4.57)$$

Entonces se tiene:

$$v_i = \left(\sum_{j=1}^i U_{ij} \dot{q}_j \right) {}^i r_i \quad (4.58)$$

De la ecuación (4.58) es posible obtener las velocidades de los eslabones, las ecuaciones quedaran así:

Eslabón 1 que corresponde al desplazamiento en z

$$v_1 = (U_{11} \dot{q}_1) {}^1 r_1$$

Eslabón 1 que corresponde al desplazamiento en y

$$v_2 = (U_{11} \dot{q}_1 + U_{21} \dot{q}_1 + U_{12} \dot{q}_2 + U_{22} \dot{q}_2) {}^2 r_2$$

Eslabón 1 que corresponde al desplazamiento en x

$$v_3 = (U_{11} \dot{q}_1 + U_{21} \dot{q}_1 + U_{31} \dot{q}_1 + U_{22} \dot{q}_2 + U_{32} \dot{q}_2 + U_{33} \dot{q}_3) {}^3 r_3$$

Eslabón 1 que corresponde a la rotación en z

$$v_4 = (U_{11} \dot{q}_1 + U_{21} \dot{q}_1 + U_{31} \dot{q}_1 + U_{41} \dot{q}_1 + U_{22} \dot{q}_2 + U_{32} \dot{q}_2 + U_{42} \dot{q}_2 + U_{33} \dot{q}_3 + U_{43} \dot{q}_3 + U_{44} \dot{q}_4) {}^4 r_4$$

Eslabón 1 que corresponde a la rotación en y

$$v_5 = (U_{11}\dot{q}_1 + U_{21}\dot{q}_1 + U_{31}\dot{q}_1 + U_{41}\dot{q}_1 + U_{51}\dot{q}_1 + U_{22}\dot{q}_2 + U_{32}\dot{q}_2 + U_{42}\dot{q}_2 + U_{52}\dot{q}_2 + U_{33}\dot{q}_3 + U_{43}\dot{q}_3 + U_{53}\dot{q}_3 + U_{44}\dot{q}_4 + U_{54}\dot{q}_4 + U_{55}\dot{q}_5)^5 r_5$$

Eslabón 1 que corresponde a la rotación en x

$$v_6 = (U_{11}\dot{q}_1 + U_{21}\dot{q}_1 + U_{31}\dot{q}_1 + U_{41}\dot{q}_1 + U_{51}\dot{q}_1 + U_{61}\dot{q}_1 + U_{22}\dot{q}_2 + U_{32}\dot{q}_2 + U_{42}\dot{q}_2 + U_{52}\dot{q}_2 + U_{62}\dot{q}_2 + U_{33}\dot{q}_3 + U_{43}\dot{q}_3 + U_{53}\dot{q}_3 + U_{63}\dot{q}_3 + U_{44}\dot{q}_4 + U_{54}\dot{q}_4 + U_{64}\dot{q}_4 + U_{55}\dot{q}_5 + U_{65}\dot{q}_5 + U_{66}\dot{q}_6)^6 r_6$$

Para determinar los efectos de la interacción entre las articulaciones se plantea la ecuación (4.59)

$$\frac{\partial U_{\dot{y}}}{\partial q_k} = U_{ijk} = {}^0A_{j-1}Q_j^{j-1}A_{k-1}Q_k^{k-1}A_i \quad (4.59)$$

La ecuación (4.59) permite conocer la magnitud del efecto de la interacción del movimiento de la articulación j y k sobre los puntos del elemento i .

La energía cinética está determinada por las ecuaciones (4.60) y (4.61) a continuación

$$dK = \frac{1}{2}(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2)dm \quad (4.60)$$

$$dK = \frac{1}{2}(v_i v_i^T)dm \quad (4.61)$$

La traza en la ecuación anterior es utilizada en lugar de un producto escalar de vectores para formar el tensor de inercia.

Al sustituir las velocidades en la ecuación (4.61) se tiene:

$$dK = \frac{1}{2} Tr \left[\sum_{p=1}^i U_{ip} \dot{q}_p {}^i r_i \left(\sum_{r=1}^i U_{ir} \dot{q}_r {}^i r_i \right)^T \right] dm \quad (4.62)$$

$$dK = \frac{1}{2} Tr \left[\sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i U_{ip} {}^i r_i {}^i r_i^T U_{ir}^T \dot{q}_p \dot{q}_r \right] dm \quad (4.63)$$

$$dK = \frac{1}{2} Tr \left[\sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i U_{ip} ({}^i r_i dm {}^i r_i^T) U_{ir}^T \dot{q}_p \dot{q}_r \right] \quad (4.64)$$

U_{ip} es la matriz de velocidades de cambio de los puntos (${}^i r_i$) sobre el elemento i , con respecto al eje de coordenadas de la base cuando q_j cambia. También \dot{q}_i son independientes de la masa del elemento i , entonces, sumando todas las energías cinéticas de todos los elementos dentro de los corchetes se tiene la ecuación (4.65):

$$K_i = \int dK_i = \frac{1}{2} Tr \left[\sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i U_{ip} \left(\int {}^i r_i dm {}^i r_i^T \right) U_{ir}^T \dot{q}_p \dot{q}_r \right] \quad (4.65)$$

El término $\int {}^i r_i dm {}^i r_i^T$ corresponde a la matriz de inercia de todos los puntos i , por lo que se tiene la matriz (4.66).

$$J_i = \int {}^i r_i dm {}^i r_i^T$$

$$J_i = \begin{bmatrix} \int x_i^2 dm & \int x_i y_i dm & \int x_i z_i dm & \int x_i dm \\ \int x_i y_i dm & \int y_i^2 dm & \int y_i z_i dm & \int y_i dm \\ \int x_i z_i dm & \int y_i z_i dm & \int z_i^2 dm & \int z_i dm \\ \int x_i dm & \int y_i dm & \int z_i dm & \int dm \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

Si J_i se expresa como tensor de inercia se tiene la matriz (4.67).

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{xy} & I_{xz} & m_i \bar{x}_i \\ I_{xy} & \frac{I_{xx} - I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{yz} & m_i \bar{y}_i \\ I_{xz} & I_{yz} & \frac{I_{xx} + I_{yy} - I_{zz}}{2} & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

Para el AUV J_i estará posicionada en el plano “X Z” que es plano de simetría, el eje “Y” es principal de inercia entonces $\bar{I}_{xy}, \bar{I}_{yx}, \bar{I}_{yz}, \bar{I}_{zy}$ son nulos, por lo cual se tiene la siguiente matriz.

$$J_i = \begin{bmatrix} I_x & 0 & -I_{xz} & 0 \\ 0 & I_y & 0 & 0 \\ -I_{zx} & 0 & I_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

Una vez planteada la matriz del tensor de inercia se puede calcular la energía cinética del AUV usando los datos de la velocidad calculada.

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Tr \left(\sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i [(U_{ip} J_i U_{ir}^T) \dot{q}_p \dot{q}_r] \right) \quad (4.69)$$

Desarrollando la ecuación (4.69), se obtuvo:

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i [Tr(U_{ip} J_i U_{ir}^T) \dot{q}_p \dot{q}_r] \quad (4.70)$$

Para $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$

$$\begin{aligned}
 K = \frac{1}{2} & \left(\begin{aligned}
 & Tr(U_{11}J_1U_{11}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + Tr(U_{21}J_2U_{21}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + Tr(U_{21}J_2U_{22}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{22}J_2U_{21}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + Tr(U_{22}J_2U_{22}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + Tr(U_{31}J_3U_{31}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{31}J_3U_{32}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + Tr(U_{31}J_3U_{33}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + Tr(U_{32}J_3U_{31}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{32}J_3U_{32}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + Tr(U_{32}J_3U_{33}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + Tr(U_{33}J_3U_{31}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{33}J_3U_{32}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + Tr(U_{33}J_3U_{33}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + Tr(U_{41}J_4U_{41}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{41}J_4U_{42}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + Tr(U_{41}J_4U_{43}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + Tr(U_{41}J_4U_{44}^T)\dot{\theta}_1\dot{\psi} \\
 & + Tr(U_{42}J_4U_{41}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + Tr(U_{42}J_4U_{42}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + Tr(U_{42}J_4U_{43}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \\
 & + Tr(U_{42}J_4U_{44}^T)\dot{\theta}_2\dot{\psi} + Tr(U_{43}J_4U_{41}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + Tr(U_{43}J_4U_{42}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{43}J_4U_{43}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + Tr(U_{43}J_4U_{44}^T)\dot{\theta}_3\dot{\psi} + Tr(U_{44}J_4U_{41}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{44}J_4U_{42}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_2 + Tr(U_{44}J_4U_{43}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + Tr(U_{44}J_4U_{44}^T)\dot{\psi}\dot{\psi} \\
 & + Tr(U_{51}J_5U_{51}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + Tr(U_{51}J_5U_{52}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + Tr(U_{51}J_5U_{53}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 \\
 & + Tr(U_{51}J_5U_{54}^T)\dot{\theta}_1\dot{\psi} + Tr(U_{51}J_5U_{55}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta} + Tr(U_{52}J_5U_{51}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{52}J_5U_{52}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + Tr(U_{52}J_5U_{53}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + Tr(U_{52}J_5U_{54}^T)\dot{\theta}_2\dot{\psi} \\
 & + Tr(U_{52}J_5U_{55}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta} + Tr(U_{53}J_5U_{51}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + Tr(U_{53}J_5U_{52}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{53}J_5U_{53}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + Tr(U_{53}J_5U_{54}^T)\dot{\theta}_3\dot{\psi} + Tr(U_{53}J_5U_{55}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{54}J_5U_{51}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + Tr(U_{54}J_5U_{52}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_2 + Tr(U_{54}J_5U_{53}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_3 \\
 & + Tr(U_{54}J_5U_{54}^T)\dot{\psi}\dot{\psi} + Tr(U_{54}J_5U_{55}^T)\dot{\psi}\dot{\theta} + Tr(U_{55}J_5U_{51}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{55}J_5U_{52}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + Tr(U_{55}J_5U_{53}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + Tr(U_{55}J_5U_{54}^T)\dot{\theta}\dot{\psi} \\
 & + Tr(U_{55}J_5U_{55}^T)\dot{\theta}\dot{\theta} + Tr(U_{61}J_6U_{61}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + Tr(U_{61}J_6U_{62}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{61}J_6U_{63}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + Tr(U_{61}J_6U_{64}^T)\dot{\theta}_1\dot{\psi} + Tr(U_{61}J_6U_{65}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{61}J_6U_{66}^T)\dot{\theta}_1\dot{\phi} + Tr(U_{62}J_6U_{61}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + Tr(U_{62}J_6U_{62}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{62}J_6U_{63}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + Tr(U_{62}J_6U_{64}^T)\dot{\theta}_2\dot{\psi} + Tr(U_{62}J_6U_{65}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{62}J_6U_{66}^T)\dot{\theta}_2\dot{\phi} + Tr(U_{63}J_6U_{61}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + Tr(U_{63}J_6U_{62}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{63}J_6U_{63}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + Tr(U_{63}J_6U_{64}^T)\dot{\theta}_3\dot{\psi} + Tr(U_{63}J_6U_{65}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{63}J_6U_{66}^T)\dot{\theta}_3\dot{\phi} + Tr(U_{64}J_6U_{61}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + Tr(U_{64}J_6U_{62}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{64}J_6U_{63}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + Tr(U_{64}J_6U_{64}^T)\dot{\psi}\dot{\psi} + Tr(U_{64}J_6U_{65}^T)\dot{\psi}\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{64}J_6U_{66}^T)\dot{\psi}\dot{\phi} + Tr(U_{65}J_6U_{61}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_1 + Tr(U_{65}J_6U_{62}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{65}J_6U_{63}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + Tr(U_{65}J_6U_{64}^T)\dot{\theta}\dot{\psi} + Tr(U_{65}J_6U_{65}^T)\dot{\theta}\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{65}J_6U_{66}^T)\dot{\theta}\dot{\phi} + Tr(U_{66}J_6U_{61}^T)\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + Tr(U_{66}J_6U_{62}^T)\dot{\phi}\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{66}J_6U_{63}^T)\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + Tr(U_{66}J_6U_{64}^T)\dot{\phi}\dot{\psi} + Tr(U_{66}J_6U_{65}^T)\dot{\phi}\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{66}J_6U_{66}^T)\dot{\phi}\dot{\phi}
 \end{aligned} \right) \quad (4.71)
 \end{aligned}$$

4.1.11 Energía potencial del AUV

La energía potencial esta denominada por la letra P , el cálculo de la energía cinética estará dada por la siguiente expresión:

$$P_i = -m_i g {}^0\bar{r}_i = -m_i g ({}^0A_i {}^i\bar{r}_i) \quad (4.72)$$

La energía total del AUV estará dada por la suma de la energía potencia de cada uno de los elementos, para poder hacer este cálculo se usará la ecuación (4.73).

$$P_i = \sum_{i=1}^n -m_i g ({}^0A_i {}^i\bar{r}_i) \quad (4.73)$$

Donde g es la gravedad, aplicada en el sistema de coordenadas inercial y esta expresada en un vector fila

$$g = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9,8 \\ 0 \end{bmatrix} m/seg^2$$

Reemplazando en (4.73) se tendrá:

$$\begin{aligned}
 P = & -m_1 g({}^0A_1{}^1\bar{r}_1) - m_2 g({}^0A_2{}^2\bar{r}_2) \\
 & -m_3 g({}^0A_3{}^3\bar{r}_3) - m_4 g({}^0A_4{}^4\bar{r}_4) \\
 & -m_5 g({}^0A_5{}^5\bar{r}_5) - m_6 g({}^0A_6{}^6\bar{r}_6)
 \end{aligned} \tag{4.74}$$

4.1.12 Ecuaciones de movimiento del AUV

Planteando la función lagrangiana (4.51) se tendrá:

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i [Tr(U_{ip} J_i U_{ir}^T) \dot{q}_p \dot{q}_r] + \sum_{i=1}^n -m_i g({}^0A_i{}^i\bar{r}_i) \tag{4.75}$$

Sustituyendo (4.71) y (4.74) en (4.76).

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{1}{2} \left[\begin{aligned}
 & Tr(U_{11}J_1U_{11}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + Tr(U_{21}J_2U_{21}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + Tr(U_{21}J_2U_{22}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{22}J_2U_{21}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + Tr(U_{22}J_2U_{22}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + Tr(U_{31}J_3U_{31}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{31}J_3U_{32}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + Tr(U_{31}J_3U_{33}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + Tr(U_{32}J_3U_{31}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{32}J_3U_{32}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + Tr(U_{32}J_3U_{33}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + Tr(U_{33}J_3U_{31}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{33}J_3U_{32}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + Tr(U_{33}J_3U_{33}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + Tr(U_{41}J_4U_{41}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{41}J_4U_{42}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + Tr(U_{41}J_4U_{43}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + Tr(U_{41}J_4U_{44}^T)\dot{\theta}_1\dot{\psi} \\
 & + Tr(U_{42}J_4U_{41}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + Tr(U_{42}J_4U_{42}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + Tr(U_{42}J_4U_{43}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \\
 & + Tr(U_{42}J_4U_{44}^T)\dot{\theta}_2\dot{\psi} + Tr(U_{43}J_4U_{41}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + Tr(U_{43}J_4U_{42}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{43}J_4U_{43}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + Tr(U_{43}J_4U_{44}^T)\dot{\theta}_3\dot{\psi} + Tr(U_{44}J_4U_{41}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{44}J_4U_{42}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_2 + Tr(U_{44}J_4U_{43}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + Tr(U_{44}J_4U_{44}^T)\dot{\psi}\dot{\psi} \\
 & + Tr(U_{51}J_5U_{51}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + Tr(U_{51}J_5U_{52}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + Tr(U_{51}J_5U_{53}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 \\
 & + Tr(U_{51}J_5U_{54}^T)\dot{\theta}_1\dot{\psi} + Tr(U_{51}J_5U_{55}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta} + Tr(U_{52}J_5U_{51}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{52}J_5U_{52}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + Tr(U_{52}J_5U_{53}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + Tr(U_{52}J_5U_{54}^T)\dot{\theta}_2\dot{\psi} \\
 & + Tr(U_{52}J_5U_{55}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta} + Tr(U_{53}J_5U_{51}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + Tr(U_{53}J_5U_{52}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{53}J_5U_{53}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + Tr(U_{53}J_5U_{54}^T)\dot{\theta}_3\dot{\psi} + Tr(U_{53}J_5U_{55}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{54}J_5U_{51}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + Tr(U_{54}J_5U_{52}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_2 + Tr(U_{54}J_5U_{53}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_3 \\
 & + Tr(U_{54}J_5U_{54}^T)\dot{\psi}\dot{\psi} + Tr(U_{54}J_5U_{55}^T)\dot{\psi}\dot{\theta} + Tr(U_{55}J_5U_{51}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_1 \\
 & + Tr(U_{55}J_5U_{52}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + Tr(U_{55}J_5U_{53}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + Tr(U_{55}J_5U_{54}^T)\dot{\theta}\dot{\psi} \\
 & + Tr(U_{55}J_5U_{55}^T)\dot{\theta}\dot{\theta} + Tr(U_{61}J_6U_{61}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + Tr(U_{61}J_6U_{62}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{61}J_6U_{63}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + Tr(U_{61}J_6U_{64}^T)\dot{\theta}_1\dot{\psi} + Tr(U_{61}J_6U_{65}^T)\dot{\theta}_1\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{61}J_6U_{66}^T)\dot{\theta}_1\dot{\phi} + Tr(U_{62}J_6U_{61}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + Tr(U_{62}J_6U_{62}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{62}J_6U_{63}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + Tr(U_{62}J_6U_{64}^T)\dot{\theta}_2\dot{\psi} + Tr(U_{62}J_6U_{65}^T)\dot{\theta}_2\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{62}J_6U_{66}^T)\dot{\theta}_2\dot{\phi} + Tr(U_{63}J_6U_{61}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + Tr(U_{63}J_6U_{62}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{63}J_6U_{63}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + Tr(U_{63}J_6U_{64}^T)\dot{\theta}_3\dot{\psi} + Tr(U_{63}J_6U_{65}^T)\dot{\theta}_3\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{63}J_6U_{66}^T)\dot{\theta}_3\dot{\phi} + Tr(U_{64}J_6U_{61}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + Tr(U_{64}J_6U_{62}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{64}J_6U_{63}^T)\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + Tr(U_{64}J_6U_{64}^T)\dot{\psi}\dot{\psi} + Tr(U_{64}J_6U_{65}^T)\dot{\psi}\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{64}J_6U_{66}^T)\dot{\psi}\dot{\phi} + Tr(U_{65}J_6U_{61}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_1 + Tr(U_{65}J_6U_{62}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{65}J_6U_{63}^T)\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + Tr(U_{65}J_6U_{64}^T)\dot{\theta}\dot{\psi} + Tr(U_{65}J_6U_{65}^T)\dot{\theta}\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{65}J_6U_{66}^T)\dot{\theta}\dot{\phi} + Tr(U_{66}J_6U_{61}^T)\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + Tr(U_{66}J_6U_{62}^T)\dot{\phi}\dot{\theta}_2 \\
 & + Tr(U_{66}J_6U_{63}^T)\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + Tr(U_{66}J_6U_{64}^T)\dot{\phi}\dot{\psi} + Tr(U_{66}J_6U_{65}^T)\dot{\phi}\dot{\theta} \\
 & + Tr(U_{66}J_6U_{66}^T)\dot{\phi}\dot{\phi}
 \end{aligned} \right] \quad (4.76)
 \end{aligned}$$

$$- \begin{pmatrix} -m_1g({}^0A_1{}^1\bar{r}_1) - m_2g({}^0A_2{}^2\bar{r}_2) \\ -m_3g({}^0A_3{}^3\bar{r}_3) - m_4g({}^0A_4{}^4\bar{r}_4) \\ -m_5g({}^0A_5{}^5\bar{r}_5) - m_6g({}^0A_6{}^6\bar{r}_6) \end{pmatrix}$$

Aplicando la función de Lagrange-Euler a la función lagrangiana se puede determinar los pares que generan el movimiento del AUV, teniendo entonces la siguiente expresión.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (4.77)$$

Donde:

$\tau(t) = n \times 1$ Vector par generalizado generado en el cuerpo, cuyos elementos son:

$$\tau(t) = \begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \\ \tau_3(t) \\ \tau_4(t) \\ \tau_5(t) \\ \tau_6(t) \end{bmatrix}$$

$q(t)$ = es un vector $n \times 1$ de las variables de desplazamientos del AUV, cuyos elementos son

$$q(t) = \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \\ q_4(t) \\ q_5(t) \\ q_6(t) \end{bmatrix}$$

$$q(t) = \begin{bmatrix} d1 \\ d2 \\ d3 \\ \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$$

$\dot{q}(t)$ = es un vector $n \times 1$ de las variables de velocidad del AUV, cuyos elementos son.

$$\dot{q}(t) = \begin{bmatrix} \dot{q}_1(t) \\ \dot{q}_2(t) \\ \dot{q}_3(t) \\ \dot{q}_4(t) \\ \dot{q}_5(t) \\ \dot{q}_6(t) \end{bmatrix}$$

$\ddot{q}(t)$ = es un vector $n \times 1$ de las variables de aceleración del AUV, cuyos elementos son.

$$\ddot{q}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1(t) \\ \ddot{q}_2(t) \\ \ddot{q}_3(t) \\ \ddot{q}_4(t) \\ \ddot{q}_5(t) \\ \ddot{q}_6(t) \end{bmatrix}$$

Matricialmente la ecuación (4.77) quedará así:

$$\tau_i = \sum_{k=1}^n D_{ik} \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m + c_i \quad (4.78)$$

Donde:

$D(q)$ = la matriz de inercia relacionada con la aceleración $n \times n$ cuyos elementos son

$$D_{ik} = \sum_{j=\max(i,k)}^n Tr(U_{ip} J_i U_{ir}^T) \quad (4.79)$$

$h(q, \dot{q})$ = vector de fuerza de Coriolis y centrifuga no lineal $n \times 1$ cuyos elementos son:

$$h(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$h_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m \quad (4.80)$$

$$h_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n \text{Tr}(U_{jkm} J_j U_{ji}^T) \quad (4.81)$$

$c(q)$ = un vector de fuerza de la carga gravitatoria $n \times 1$ cuyos elementos son

$$c(q) = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$c_i = \sum_{j=1}^n (-m_j g U_{ij}^j \bar{r}_j) \quad (4.82)$$

Las ecuaciones que describirán las fuerzas debidas a la gravedad para cada elemento se presentan a continuación:

$$c_1 = -m_1 g U_{11} r_1 - m_2 g U_{21} r_2 - m_3 g U_{31} r_3 - m_4 g U_{41} r_4 \\ - m_5 g U_{51} r_5 - m_6 g U_{61} r_6$$

$$c_2 = -m_2 g U_{22} r_2 - m_3 g U_{32} r_3 - m_4 g U_{42} r_4 - m_5 g U_{52} r_5 \\ - m_6 g U_{62} r_6$$

$$c_3 = -m_3 g U_{33} r_3 - m_4 g U_{43} r_4 - m_5 g U_{53} r_5 - m_6 g U_{63} r_6$$

$$c_4 = -m_4 g U_{44} r_4 - m_5 g U_{54} r_5 - m_6 g U_{64} r_6$$

$$c_5 = -m_5 g U_{55} r_5 - m_6 g U_{65} r_6$$

$$c_6 = -m_6 g U_{66} r_6$$

La matriz inercial que relaciona la aceleración será:

$$D_{11} = Tr(U_{11} J_1 U_{11}^T) + Tr(U_{21} J_2 U_{21}^T) + Tr(U_{31} J_3 U_{31}^T) \\ + Tr(U_{41} J_4 U_{41}^T) + Tr(U_{51} J_5 U_{51}^T) + Tr(U_{61} J_6 U_{61}^T)$$

$$D_{12} = Tr(U_{22} J_2 U_{21}^T) + Tr(U_{32} J_3 U_{31}^T) + Tr(U_{42} J_4 U_{41}^T) \\ + Tr(U_{52} J_5 U_{51}^T) + Tr(U_{62} J_6 U_{61}^T)$$

$$D_{13} = Tr(U_{33} J_3 U_{31}^T) + Tr(U_{43} J_4 U_{41}^T) + Tr(U_{53} J_5 U_{51}^T) \\ + Tr(U_{63} J_6 U_{61}^T)$$

$$D_{14} = Tr(U_{44} J_4 U_{41}^T) + Tr(U_{54} J_5 U_{51}^T) + Tr(U_{64} J_6 U_{61}^T)$$

$$D_{15} = Tr(U_{55}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{65}J_5U_{61}^T)$$

$$D_{16} = Tr(U_{66}J_6U_{61}^T)$$

$$D_{21} = Tr(U_{21}J_2U_{22}^T) + Tr(U_{31}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{41}J_4U_{42}^T) \\ + Tr(U_{51}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{61}J_6U_{62}^T)$$

$$D_{22} = Tr(U_{22}J_2U_{22}^T) + Tr(U_{32}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{42}J_4U_{42}^T) \\ + Tr(U_{52}J_2U_{52}^T) + Tr(U_{62}J_6U_{62}^T)$$

$$D_{23} = Tr(U_{33}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{43}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{53}J_5U_{52}^T) \\ + Tr(U_{63}J_6U_{62}^T)$$

$$D_{24} = Tr(U_{44}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{54}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{64}J_6U_{62}^T)$$

$$D_{25} = Tr(U_{55}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{65}J_6U_{62}^T)$$

$$D_{26} = Tr(U_{66}J_6U_{62}^T)$$

$$D_{31} = Tr(U_{31}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{41}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{51}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{61}J_6U_{63}^T)$$

$$D_{32} = Tr(U_{32}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{42}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{52}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{61}J_6U_{63}^T)$$

$$D_{33} = Tr(U_{33}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{43}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{53}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{63}J_6U_{63}^T)$$

$$D_{34} = Tr(U_{44}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{54}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{64}J_6U_{63}^T)$$

$$D_{35} = Tr(U_{55}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{63}J_6U_{63}^T)$$

$$D_{36} = Tr(U_{66}J_6U_{63}^T)$$

$$D_{41} = Tr(U_{41}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{51}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{61}J_6U_{64}^T)$$

$$D_{42} = Tr(U_{42}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{52}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{62}J_6U_{64}^T)$$

$$D_{43} = Tr(U_{43}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{53}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{63}J_6U_{64}^T)$$

$$D_{44} = Tr(U_{44}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{54}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{64}J_6U_{64}^T)$$

$$D_{45} = Tr(U_{55}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{65}J_6U_{64}^T)$$

$$D_{46} = Tr(U_{66}J_6U_{64}^T)$$

$$D_{51} = Tr(U_{51}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{61}J_6U_{65}^T)$$

$$D_{52} = Tr(U_{52}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{62}J_6U_{65}^T)$$

$$D_{53} = Tr(U_{53}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{63}J_6U_{65}^T)$$

$$D_{54} = Tr(U_{54}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{64}J_6U_{65}^T)$$

$$D_{55} = Tr(U_{55}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{65}J_6U_{65}^T)$$

$$D_{56} = Tr(U_{65}J_5U_{65}^T)$$

$$D_{61} = Tr(U_{61}J_6U_{66}^T)$$

$$D_{62} = Tr(U_{62}J_6U_{66}^T)$$

$$D_{63} = Tr(U_{63}J_6U_{66}^T)$$

$$D_{64} = Tr(U_{64}J_6U_{66}^T)$$

$$D_{65} = Tr(U_{65}J_6U_{66}^T)$$

$$D_{66} = Tr(U_{66}J_6U_{66}^T)$$

4.1.13 Cálculo del vector de fuerza de coriolis y centrifuga

$$h(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{bmatrix}$$

Al desarrollar las ecuaciones (4.80) y (4.81) se obtendrán los vectores de fuerza de coriolis y centrifuga, a continuación se presenta el resultado:

$$h_{111} = Tr(U_{111}J_1U_{11}^T) + Tr(U_{211}J_2U_{21}^T) + Tr(U_{311}J_3U_{31}^T) \\ + Tr(U_{411}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{511}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{611}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{112} = Tr(U_{212}J_2U_{21}^T) + Tr(U_{312}J_3U_{31}^T) + Tr(U_{412}J_4U_{41}^T) \\ + Tr(U_{512}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{612}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{113} = Tr(U_{313}J_3U_{31}^T) + Tr(U_{413}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{513}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{613}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{114} = Tr(U_{414}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{514}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{614}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{115} = Tr(U_{515}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{615}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{116} = Tr(U_{616}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{121} = Tr(U_{221}J_2U_{21}^T) + Tr(U_{321}J_3U_{31}^T) + Tr(U_{421}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{521}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{621}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{122} = Tr(U_{222}J_2U_{21}^T) + Tr(U_{322}J_3U_{31}^T) + Tr(U_{422}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{522}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{622}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{123} = Tr(U_{323}J_3U_{31}^T) + Tr(U_{423}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{523}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{623}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{124} = Tr(U_{424}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{524}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{624}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{125} = Tr(U_{525}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{625}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{126} = Tr(U_{626}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{131} = Tr(U_{331}J_3U_{31}^T) + Tr(U_{431}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{531}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{631}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{132} = Tr(U_{332}J_3U_{31}^T) + Tr(U_{432}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{532}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{632}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{133} = Tr(U_{333}J_3U_{31}^T) + Tr(U_{433}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{533}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{633}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{134} = Tr(U_{434}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{534}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{634}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{135} = Tr(U_{535}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{635}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{136} = Tr(U_{636}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{141} = Tr(U_{441}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{541}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{641}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{142} = Tr(U_{442}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{542}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{642}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{143} = Tr(U_{443}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{543}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{643}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{144} = Tr(U_{444}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{544}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{644}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{145} = Tr(U_{545}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{645}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{146} = Tr(U_{646}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{151} = Tr(U_{551}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{651}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{152} = Tr(U_{552}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{652}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{153} = Tr(U_{553}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{653}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{154} = Tr(U_{554}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{654}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{155} = Tr(U_{555}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{655}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{156} = Tr(U_{656}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{161} = Tr(U_{661}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{162} = Tr(U_{662}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{163} = Tr(U_{663}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{164} = Tr(U_{664}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{165} = Tr(U_{665}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{166} = Tr(U_{666}J_6U_{61}^T)$$

$$h_{211} = Tr(U_{211}J_2U_{22}^T) + Tr(U_{311}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{411}J_4U_{42}^T) \\ + Tr(U_{511}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{611}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{212} = Tr(U_{212}J_2U_{22}^T) + Tr(U_{312}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{412}J_4U_{42}^T) \\ + Tr(U_{512}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{612}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{213} = Tr(U_{313}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{413}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{513}J_5U_{52}^T) \\ + Tr(U_{613}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{214} = Tr(U_{414}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{514}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{614}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{215} = Tr(U_{515}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{615}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{216} = Tr(U_{616}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{221} = Tr(U_{221}J_2U_{22}^T) + Tr(U_{321}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{421}J_4U_{42}^T) \\ + Tr(U_{521}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{621}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{222} = Tr(U_{222}J_2U_{22}^T) + Tr(U_{322}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{422}J_4U_{42}^T) \\ + Tr(U_{522}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{622}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{223} = Tr(U_{323}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{423}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{523}J_5U_{52}^T) \\ + Tr(U_{623}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{224} = Tr(U_{424}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{524}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{624}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{225} = Tr(U_{525}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{625}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{226} = Tr(U_{626}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{231} = Tr(U_{331}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{431}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{531}J_5U_{52}^T) \\ + Tr(U_{631}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{232} = Tr(U_{332}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{432}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{532}J_5U_{52}^T) \\ + Tr(U_{632}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{233} = Tr(U_{333}J_3U_{32}^T) + Tr(U_{433}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{533}J_5U_{52}^T) \\ + Tr(U_{633}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{234} = Tr(U_{434}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{534}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{634}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{235} = Tr(U_{535}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{635}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{236} = Tr(U_{636}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{241} = Tr(U_{441}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{541}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{641}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{242} = Tr(U_{442}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{542}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{642}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{243} = Tr(U_{443}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{543}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{643}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{244} = Tr(U_{444}J_4U_{42}^T) + Tr(U_{544}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{644}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{245} = Tr(U_{545}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{645}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{246} = Tr(U_{646}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{251} = Tr(U_{551}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{651}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{252} = Tr(U_{552}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{652}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{253} = Tr(U_{553}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{653}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{254} = Tr(U_{554}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{654}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{255} = Tr(U_{555}J_5U_{52}^T) + Tr(U_{655}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{256} = Tr(U_{656}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{261} = Tr(U_{661}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{262} = Tr(U_{662}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{263} = Tr(U_{663}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{264} = Tr(U_{664}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{265} = Tr(U_{665}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{266} = Tr(U_{666}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{311} = Tr(U_{311}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{411}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{511}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{611}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{312} = Tr(U_{312}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{412}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{512}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{612}J_6U_{62}^T)$$

$$h_{313} = Tr(U_{313}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{413}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{513}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{613}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{314} = Tr(U_{414}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{514}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{614}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{315} = Tr(U_{515}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{615}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{316} = Tr(U_{616}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{321} = Tr(U_{321}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{421}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{521}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{621}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{322} = Tr(U_{322}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{422}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{522}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{622}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{323} = Tr(U_{323}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{423}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{523}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{623}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{324} = Tr(U_{424}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{524}J_5U_{43}^T) + Tr(U_{624}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{325} = Tr(U_{525}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{625}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{326} = Tr(U_{626}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{331} = Tr(U_{331}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{431}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{531}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{631}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{332} = Tr(U_{332}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{432}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{532}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{632}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{333} = Tr(U_{333}J_3U_{33}^T) + Tr(U_{433}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{533}J_5U_{53}^T) \\ + Tr(U_{633}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{334} = Tr(U_{434}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{534}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{634}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{335} = Tr(U_{535}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{635}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{336} = Tr(U_{636}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{341} = Tr(U_{441}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{541}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{641}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{342} = Tr(U_{442}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{542}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{642}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{343} = Tr(U_{443}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{543}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{643}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{344} = Tr(U_{444}J_4U_{43}^T) + Tr(U_{544}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{644}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{345} = Tr(U_{545}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{645}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{346} = Tr(U_{646}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{351} = Tr(U_{551}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{651}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{352} = Tr(U_{552}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{652}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{353} = Tr(U_{553}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{653}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{354} = Tr(U_{554}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{654}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{355} = Tr(U_{555}J_5U_{53}^T) + Tr(U_{655}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{356} = Tr(U_{656}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{361} = Tr(U_{661}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{362} = Tr(U_{662}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{363} = Tr(U_{663}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{364} = Tr(U_{664}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{365} = Tr(U_{665}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{366} = Tr(U_{666}J_6U_{63}^T)$$

$$h_{411} = Tr(U_{411}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{511}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{611}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{412} = Tr(U_{412}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{512}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{612}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{413} = Tr(U_{413}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{513}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{613}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{414} = Tr(U_{414}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{514}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{614}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{415} = Tr(U_{515}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{615}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{416} = Tr(U_{616}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{421} = Tr(U_{421}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{521}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{621}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{422} = Tr(U_{422}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{522}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{622}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{423} = Tr(U_{423}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{523}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{623}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{424} = Tr(U_{424}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{524}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{624}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{425} = Tr(U_{525}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{625}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{426} = Tr(U_{626}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{431} = Tr(U_{431}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{531}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{631}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{432} = Tr(U_{432}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{532}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{632}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{433} = Tr(U_{433}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{533}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{633}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{434} = Tr(U_{434}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{534}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{634}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{435} = Tr(U_{535}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{635}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{436} = Tr(U_{636}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{441} = Tr(U_{441}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{541}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{641}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{442} = Tr(U_{442}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{542}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{642}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{443} = Tr(U_{443}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{543}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{643}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{444} = Tr(U_{444}J_4U_{44}^T) + Tr(U_{544}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{644}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{445} = Tr(U_{545}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{645}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{446} = Tr(U_{646}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{451} = Tr(U_{551}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{651}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{452} = Tr(U_{552}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{652}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{453} = Tr(U_{553}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{653}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{454} = Tr(U_{554}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{654}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{455} = Tr(U_{555}J_5U_{54}^T) + Tr(U_{655}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{456} = Tr(U_{656}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{461} = Tr(U_{661}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{462} = Tr(U_{662}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{463} = Tr(U_{663}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{464} = Tr(U_{664}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{465} = Tr(U_{665}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{466} = Tr(U_{666}J_6U_{64}^T)$$

$$h_{511} = Tr(U_{511}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{611}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{512} = Tr(U_{512}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{612}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{513} = Tr(U_{513}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{613}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{514} = Tr(U_{514}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{614}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{515} = Tr(U_{515}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{615}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{516} = Tr(U_{616}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{521} = Tr(U_{521}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{621}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{522} = Tr(U_{522}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{622}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{523} = Tr(U_{523}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{623}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{524} = Tr(U_{524}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{624}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{525} = Tr(U_{525}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{625}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{526} = Tr(U_{626}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{531} = Tr(U_{531}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{631}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{532} = Tr(U_{532}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{632}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{533} = Tr(U_{533}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{633}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{534} = Tr(U_{534}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{634}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{535} = Tr(U_{535}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{635}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{536} = Tr(U_{636}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{541} = Tr(U_{541}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{641}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{542} = Tr(U_{542}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{642}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{543} = Tr(U_{543}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{643}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{544} = Tr(U_{544}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{644}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{545} = Tr(U_{545}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{645}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{546} = Tr(U_{646}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{551} = Tr(U_{551}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{651}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{552} = Tr(U_{552}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{652}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{553} = Tr(U_{553}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{653}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{554} = Tr(U_{554}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{654}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{555} = Tr(U_{555}J_5U_{55}^T) + Tr(U_{655}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{556} = Tr(U_{656}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{561} = Tr(U_{661}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{562} = Tr(U_{662}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{563} = Tr(U_{663}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{564} = Tr(U_{664}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{565} = Tr(U_{665}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{566} = Tr(U_{666}J_6U_{65}^T)$$

$$h_{611} = Tr(U_{611}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{612} = Tr(U_{612}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{613} = Tr(U_{613}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{614} = Tr(U_{614}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{615} = Tr(U_{615}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{616} = Tr(U_{616}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{621} = Tr(U_{621}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{622} = Tr(U_{622}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{623} = Tr(U_{623}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{624} = Tr(U_{624}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{625} = Tr(U_{625}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{626} = Tr(U_{626}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{631} = Tr(U_{631}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{632} = Tr(U_{632}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{633} = Tr(U_{633}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{634} = Tr(U_{634}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{635} = Tr(U_{635}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{636} = Tr(U_{636}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{641} = Tr(U_{641}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{642} = Tr(U_{642}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{643} = Tr(U_{643}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{644} = Tr(U_{644}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{645} = Tr(U_{645}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{646} = Tr(U_{646}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{651} = Tr(U_{651}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{652} = Tr(U_{652}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{653} = Tr(U_{653}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{654} = Tr(U_{654}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{655} = Tr(U_{655}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{656} = Tr(U_{656}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{661} = Tr(U_{661}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{662} = Tr(U_{662}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{663} = Tr(U_{663}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{664} = Tr(U_{664}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{665} = Tr(U_{665}J_6U_{66}^T)$$

$$h_{666} = Tr(U_{666}J_6U_{66}^T)$$

De forma no lineal los vectores de fuerza de coriolis y centrifuga se representan así:

$$\begin{aligned} h_1 = & h_{111}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{113}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{114}\dot{\theta}_1\dot{\psi} + h_{115}\dot{\theta}_1\dot{\theta} \\ & + h_{116}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{121}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{122}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + h_{123}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{124}\dot{\theta}_2\dot{\psi} \\ & + h_{125}\dot{\theta}_2\dot{\theta} + h_{126}\dot{\theta}_2\dot{\phi} + h_{131}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{132}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{133}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 \\ & + h_{134}\dot{\theta}_3\dot{\psi} + h_{135}\dot{\theta}_3\dot{\theta} + h_{136}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{141}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{142}\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\ & + h_{143}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{144}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{145}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{146}\dot{\psi}\dot{\phi} + h_{151}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 \\ & + h_{152}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{153}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{154}\dot{\theta}\dot{\psi} + h_{155}\dot{\theta}\dot{\theta} + h_{156}\dot{\theta}\dot{\phi} \\ & + h_{161}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{162}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 + h_{163}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{164}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{165}\dot{\phi}\dot{\theta} \\ & + h_{166}\dot{\phi}\dot{\phi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_2 = & h_{211}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{212}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{213}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{214}\dot{\theta}_1\dot{\psi} + h_{215}\dot{\theta}_1\dot{\theta} \\ & + h_{216}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{221}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{222}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + h_{223}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{224}\dot{\theta}_2\dot{\psi} \\ & + h_{225}\dot{\theta}_2\dot{\theta} + h_{226}\dot{\theta}_2\dot{\phi} + h_{231}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{232}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{233}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 \\ & + h_{234}\dot{\theta}_3\dot{\psi} + h_{235}\dot{\theta}_3\dot{\theta} + h_{236}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{241}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{242}\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\ & + h_{243}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{244}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{245}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{246}\dot{\psi}\dot{\phi} + h_{251}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 \\ & + h_{252}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{253}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{254}\dot{\theta}\dot{\psi} + h_{255}\dot{\theta}\dot{\theta} + h_{256}\dot{\theta}\dot{\phi} \\ & + h_{261}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{262}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 + h_{263}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{264}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{265}\dot{\phi}\dot{\theta} \\ & + h_{266}\dot{\phi}\dot{\phi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_3 = & h_{311}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{312}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{313}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{314}\dot{\theta}_1\dot{\psi} + h_{315}\dot{\theta}_1\dot{\theta} \\
 & + h_{316}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{321}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{322}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + h_{323}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{324}\dot{\theta}_2\dot{\psi} \\
 & + h_{325}\dot{\theta}_2\dot{\theta} + h_{326}\dot{\theta}_2\dot{\phi} + h_{331}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{332}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{333}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 \\
 & + h_{334}\dot{\theta}_3\dot{\psi} + h_{335}\dot{\theta}_3\dot{\theta} + h_{336}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{341}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{342}\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\
 & + h_{343}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{344}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{345}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{346}\dot{\psi}\dot{\phi} + h_{351}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 \\
 & + h_{352}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{353}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{354}\dot{\theta}\dot{\psi} + h_{355}\dot{\theta}\dot{\theta} + h_{356}\dot{\theta}\dot{\phi} \\
 & + h_{361}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{362}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 + h_{363}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{364}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{365}\dot{\phi}\dot{\theta} \\
 & + h_{366}\dot{\phi}\dot{\phi}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_4 = & h_{411}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{412}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{413}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{414}\dot{\theta}_1\dot{\psi} + h_{415}\dot{\theta}_1\dot{\theta} \\
 & + h_{416}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{421}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{422}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + h_{423}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{424}\dot{\theta}_2\dot{\psi} \\
 & + h_{425}\dot{\theta}_2\dot{\theta} + h_{426}\dot{\theta}_2\dot{\phi} + h_{431}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{432}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{433}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 \\
 & + h_{434}\dot{\theta}_3\dot{\psi} + h_{435}\dot{\theta}_3\dot{\theta} + h_{436}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{441}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{442}\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\
 & + h_{443}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{444}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{445}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{446}\dot{\psi}\dot{\phi} + h_{451}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 \\
 & + h_{452}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{453}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{454}\dot{\theta}\dot{\psi} + h_{455}\dot{\theta}\dot{\theta} + h_{456}\dot{\theta}\dot{\phi} \\
 & + h_{461}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{462}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 + h_{463}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{464}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{465}\dot{\phi}\dot{\theta} \\
 & + h_{466}\dot{\phi}\dot{\phi}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_5 = & h_{511}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{512}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{513}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{514}\dot{\theta}_1\dot{\psi} + h_{515}\dot{\theta}_1\dot{\theta} \\
 & + h_{516}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{521}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{522}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + h_{523}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{524}\dot{\theta}_2\dot{\psi} \\
 & + h_{525}\dot{\theta}_2\dot{\theta} + h_{526}\dot{\theta}_2\dot{\phi} + h_{531}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{532}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{533}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 \\
 & + h_{534}\dot{\theta}_3\dot{\psi} + h_{535}\dot{\theta}_3\dot{\theta} + h_{536}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{541}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{542}\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\
 & + h_{543}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{544}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{545}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{546}\dot{\psi}\dot{\phi} + h_{551}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 \\
 & + h_{552}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{553}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{554}\dot{\theta}\dot{\psi} + h_{555}\dot{\theta}\dot{\theta} + h_{556}\dot{\theta}\dot{\phi} \\
 & + h_{561}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{562}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 + h_{563}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{564}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{565}\dot{\phi}\dot{\theta} \\
 & + h_{566}\dot{\phi}\dot{\phi}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_6 = & h_{611}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{612}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{613}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{614}\dot{\theta}_1\dot{\psi} + h_{615}\dot{\theta}_1\dot{\theta} \\
 & + h_{616}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{621}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{622}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 + h_{623}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{624}\dot{\theta}_2\dot{\psi} \\
 & + h_{625}\dot{\theta}_2\dot{\theta} + h_{626}\dot{\theta}_2\dot{\phi} + h_{631}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{632}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{633}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 \\
 & + h_{634}\dot{\theta}_3\dot{\psi} + h_{635}\dot{\theta}_3\dot{\theta} + h_{636}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{641}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{642}\dot{\psi}\dot{\theta}_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+h_{643}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{644}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{645}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{646}\dot{\psi}\dot{\phi} + h_{651}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 \\
 &+h_{652}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{653}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{654}\dot{\theta}\dot{\psi} + h_{655}\dot{\theta}\dot{\theta} + h_{656}\dot{\theta}\dot{\phi} \\
 &+h_{661}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{662}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 + h_{663}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{664}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{665}\dot{\phi}\dot{\theta} \\
 &+h_{666}\dot{\phi}\dot{\phi}
 \end{aligned}$$

Con la similitud planteada entre el brazo robot y el AUV se asume que cada torque corresponde al desplazamiento en cada eje y las rotaciones de las articulaciones de rotación, entonces, los torques necesarios estarán descritos por las ecuaciones (4.84) a la (4.88)

$$\tau(t) = D(q(t))\ddot{q}(t) + h(q(t), \dot{q}(t)) + c(q(t))$$

$$\begin{aligned}
 \tau_1 = &D_{11}\ddot{\theta}_1 + D_{12}\ddot{\theta}_2 + D_{13}\ddot{\theta}_3 + D_{14}\ddot{\psi} + D_{15}\ddot{\theta} + D_{16}\ddot{\phi} \\
 &+h_{111}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{113}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{114}\dot{\theta}_1\dot{\psi} \\
 &+h_{115}\dot{\theta}_1\dot{\theta} + h_{116}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{121}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{122}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 \\
 &+h_{123}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{124}\dot{\theta}_2\dot{\psi} + h_{125}\dot{\theta}_2\dot{\theta} + h_{126}\dot{\theta}_2\dot{\phi} \\
 &+h_{131}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{132}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{133}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + h_{134}\dot{\theta}_3\dot{\psi} \\
 &+h_{135}\dot{\theta}_3\dot{\theta} + h_{136}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{141}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{142}\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\
 &+h_{143}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{144}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{145}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{146}\dot{\psi}\dot{\phi} \\
 &+h_{151}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 + h_{152}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{153}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{154}\dot{\theta}\dot{\psi} \\
 &+h_{155}\dot{\theta}\dot{\theta} + h_{156}\dot{\theta}\dot{\phi} + h_{161}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{162}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 \\
 &+h_{163}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{164}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{165}\dot{\phi}\dot{\theta} + h_{166}\dot{\phi}\dot{\phi} + c_1
 \end{aligned} \tag{4.83}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_2 = &D_{21}\ddot{\theta}_1 + D_{22}\ddot{\theta}_2 + D_{23}\ddot{\theta}_3 + D_{24}\ddot{\psi} + D_{25}\ddot{\theta} + D_{26}\ddot{\phi} \\
 &+h_{211}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{212}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{213}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{214}\dot{\theta}_1\dot{\psi} \\
 &+h_{215}\dot{\theta}_1\dot{\theta} + h_{216}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{221}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{222}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 \\
 &+h_{223}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{224}\dot{\theta}_2\dot{\psi} + h_{225}\dot{\theta}_2\dot{\theta} + h_{226}\dot{\theta}_2\dot{\phi} \\
 &+h_{231}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{232}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{233}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + h_{234}\dot{\theta}_3\dot{\psi} \\
 &+h_{235}\dot{\theta}_3\dot{\theta} + h_{236}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{241}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{242}\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\
 &+h_{243}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{244}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{245}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{246}\dot{\psi}\dot{\phi} \\
 &+h_{251}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 + h_{252}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{253}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{254}\dot{\theta}\dot{\psi}
 \end{aligned} \tag{4.84}$$

$$+h_{255}\dot{\theta}\dot{\theta} + h_{256}\dot{\theta}\dot{\phi} + h_{261}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{262}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 \\ + h_{263}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{264}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{265}\dot{\phi}\dot{\theta} + h_{266}\dot{\phi}\dot{\phi} + c_2$$

$$\begin{aligned} \tau_3 = & D_{31}\ddot{\theta}_1 + D_{32}\ddot{\theta}_2 + D_{33}\ddot{\theta}_3 + D_{34}\ddot{\psi} + D_{35}\ddot{\theta} + D_{36}\ddot{\phi} \\ & + h_{311}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{312}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{313}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{314}\dot{\theta}_1\dot{\psi} \\ & + h_{315}\dot{\theta}_1\dot{\theta} + h_{316}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{321}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{322}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 \\ & + h_{323}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{324}\dot{\theta}_2\dot{\psi} + h_{325}\dot{\theta}_2\dot{\theta} + h_{326}\dot{\theta}_2\dot{\phi} \\ & + h_{331}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{332}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{333}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + h_{334}\dot{\theta}_3\dot{\psi} \\ & + h_{335}\dot{\theta}_3\dot{\theta} + h_{336}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{341}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{342}\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\ & + h_{343}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{344}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{345}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{346}\dot{\psi}\dot{\phi} \\ & + h_{351}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 + h_{352}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{353}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{354}\dot{\theta}\dot{\psi} \\ & + h_{355}\dot{\theta}\dot{\theta} + h_{356}\dot{\theta}\dot{\phi} + h_{361}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{362}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 \\ & + h_{363}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{364}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{365}\dot{\phi}\dot{\theta} + h_{366}\dot{\phi}\dot{\phi} + c_3 \end{aligned} \quad (4.85)$$

$$\begin{aligned} \tau_4 = & D_{41}\ddot{\theta}_1 + D_{42}\ddot{\theta}_2 + D_{43}\ddot{\theta}_3 + D_{44}\ddot{\psi} + D_{45}\ddot{\theta} + D_{46}\ddot{\phi} \\ & + h_{411}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{412}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{413}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{414}\dot{\theta}_1\dot{\psi} \\ & + h_{415}\dot{\theta}_1\dot{\theta} + h_{416}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{421}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{422}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 \\ & + h_{423}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{424}\dot{\theta}_2\dot{\psi} + h_{425}\dot{\theta}_2\dot{\theta} + h_{426}\dot{\theta}_2\dot{\phi} \\ & + h_{431}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{432}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{433}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + h_{434}\dot{\theta}_3\dot{\psi} \\ & + h_{435}\dot{\theta}_3\dot{\theta} + h_{436}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{441}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{442}\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\ & + h_{443}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{444}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{445}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{446}\dot{\psi}\dot{\phi} \\ & + h_{451}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 + h_{452}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{453}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{454}\dot{\theta}\dot{\psi} \\ & + h_{455}\dot{\theta}\dot{\theta} + h_{456}\dot{\theta}\dot{\phi} + h_{461}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{462}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 \\ & + h_{463}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{464}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{465}\dot{\phi}\dot{\theta} + h_{466}\dot{\phi}\dot{\phi} + c_4 \end{aligned} \quad (4.86)$$

$$\begin{aligned} \tau_5 = & D_{51}\ddot{\theta}_1 + D_{52}\ddot{\theta}_2 + D_{53}\ddot{\theta}_3 + D_{54}\ddot{\psi} + D_{55}\ddot{\theta} + D_{56}\ddot{\phi} \\ & + h_{511}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{512}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{513}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{514}\dot{\theta}_1\dot{\psi} \\ & + h_{515}\dot{\theta}_1\dot{\theta} + h_{516}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{521}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{522}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 \\ & + h_{523}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{524}\dot{\theta}_2\dot{\psi} + h_{525}\dot{\theta}_2\dot{\theta} + h_{526}\dot{\theta}_2\dot{\phi} \\ & + h_{531}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{532}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{533}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + h_{534}\dot{\theta}_3\dot{\psi} \\ & + h_{535}\dot{\theta}_3\dot{\theta} + h_{536}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{541}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{542}\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\ & + h_{543}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{544}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{545}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{546}\dot{\psi}\dot{\phi} \end{aligned} \quad (4.87)$$

$$\begin{aligned}
 &+h_{551}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 + h_{552}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{553}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{554}\dot{\theta}\dot{\psi} \\
 &+h_{555}\dot{\theta}\dot{\phi} + h_{556}\dot{\theta}\dot{\psi} + h_{561}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{562}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 \\
 &+h_{563}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{564}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{565}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{566}\dot{\psi}\dot{\phi} + c_5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_6 = &D_{61}\ddot{\theta}_1 + D_{62}\ddot{\theta}_2 + D_{63}\ddot{\theta}_3 + D_{64}\ddot{\psi} + D_{65}\ddot{\phi} + D_{66}\ddot{\psi} \\
 &+h_{611}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_1 + h_{612}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{613}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + h_{614}\dot{\theta}_1\dot{\psi} \\
 &+h_{615}\dot{\theta}_1\dot{\phi} + h_{616}\dot{\theta}_1\dot{\psi} + h_{621}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{622}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2 \\
 &+h_{623}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + h_{624}\dot{\theta}_2\dot{\psi} + h_{625}\dot{\theta}_2\dot{\phi} + h_{626}\dot{\theta}_2\dot{\psi} \\
 &+h_{631}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 + h_{632}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_2 + h_{633}\dot{\theta}_3\dot{\theta}_3 + h_{634}\dot{\theta}_3\dot{\psi} \\
 &+h_{635}\dot{\theta}_3\dot{\phi} + h_{636}\dot{\theta}_3\dot{\psi} + h_{641}\dot{\psi}\dot{\theta}_1 + h_{642}\dot{\psi}\dot{\theta}_2 \\
 &+h_{643}\dot{\psi}\dot{\theta}_3 + h_{644}\dot{\psi}\dot{\psi} + h_{645}\dot{\psi}\dot{\phi} + h_{646}\dot{\psi}\dot{\psi} \\
 &+h_{651}\dot{\theta}\dot{\theta}_1 + h_{652}\dot{\theta}\dot{\theta}_2 + h_{653}\dot{\theta}\dot{\theta}_3 + h_{654}\dot{\theta}\dot{\psi} \\
 &+h_{655}\dot{\theta}\dot{\phi} + h_{656}\dot{\theta}\dot{\psi} + h_{661}\dot{\phi}\dot{\theta}_1 + h_{662}\dot{\phi}\dot{\theta}_2 \\
 &+h_{663}\dot{\phi}\dot{\theta}_3 + h_{664}\dot{\phi}\dot{\psi} + h_{665}\dot{\psi}\dot{\theta} + h_{666}\dot{\psi}\dot{\phi} + c_6
 \end{aligned} \tag{4.88}$$

La obtención de las ecuaciones necesarias para calcular las fuerzas generalizadas representa la culminación del cálculo de la dinámica del AUV, con todo esto se engloban los parámetros cinemáticos que gobiernan el AUV; posteriormente se podrán diseñar sistemas de control y sus respectivas estrategias de control.

Todas las ecuaciones del numeral 4.1 PLANTEAMIENTO DEL MODELADO DEL AUV están incluidas en un programa que se realizó usando el software Matlab, este programa permite hacer el cálculo de la Fuerza de Coriolis y centrífuga, los valores de la fuerza debida a la gravedad y los torques necesarios en cada uno de los vectores correspondientes al desplazamiento y los giros-orientaciones.

En el 4.2 SIMULACIÓN E INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS CFD EN EL MODELO DEL AUV, se presenta la implementación del numeral 4.1 PLANTEAMIENTO DEL MODELADO DEL AUV con uso práctico que evalúa la influencia de una corriente marina sobre el casco del AUV.

4.2 SIMULACIÓN E INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS CFD EN EL MODELO DEL AUV

Haciendo uso del software Matlab®, simulink y con los resultados del análisis CFD planteado en el numeral 2.3 ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DEL CASCO, se construyó una herramienta de simulación para determinar la influencia de la fuerza de arrastre, debida a una corriente que impacta el casco del AUV, en *Figura 4-3* se presenta el esquema general de la herramienta.

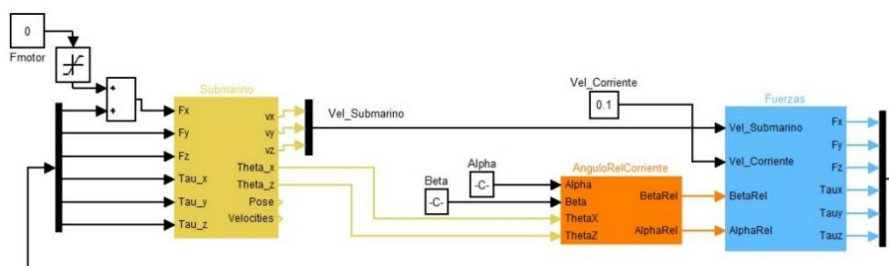


Figura 4-3 Esquema simulink herramienta de simulación

El aporte de esta herramienta radica en la posibilidad de realizar el cálculo de fuerza de arrastre en tiempo real, sin necesidad de correr simulaciones en programa CFD, los cuales tienen un costo computacional alto.

Basado en los datos de simulaciones iniciales es posible calcular el valor de las fuerzas hidrodinámicas para cualquier velocidad y ángulo de incidencia. Habitualmente los modelos implementados para hacer este tipo de análisis, consideran las fuerzas hidrodinámicas como constantes o como un porcentaje, los resultados alcanzados con esta herramienta son similares a los conseguidos con simulación CFD.

A continuación, se representan gráficamente los datos obtenidos para una mejor comprensión.

4.2.1 Componentes de la fuerza hidrodinámica

- **Fuerza en X**

En la *Figura 4-4* se muestra el comportamiento de la componente de la fuerza de arrastre en el eje X, debido al cambio en el ángulo de incidencia, es evidente que las variaciones dependen en mayor medida de los cambios del ángulo β . Salvo pequeñas alteraciones, el comportamiento es homogéneo con las variaciones en el ángulo α , esto es debido a que al tener un cuerpo simétrico, el área transversal es constante para el mismo valor de β .

Con $\beta=0^\circ$ se tienen fuerzas negativas y en consecuencia avance en sentido negativo, con $\beta 180^\circ$ pasa lo contrario, fuerzas positivas provocan avance en sentido positivo

Los picos presentados a lo largo en $\beta 0^\circ$ y $\beta 180^\circ$, se deben a que en estos puntos la corriente incide completamente en el eje longitudinal de avance (eje X). Adicionalmente en $\beta 90^\circ$ la fuerza en X es cero pues el ángulo de incidencia coincide completamente con el eje Y.

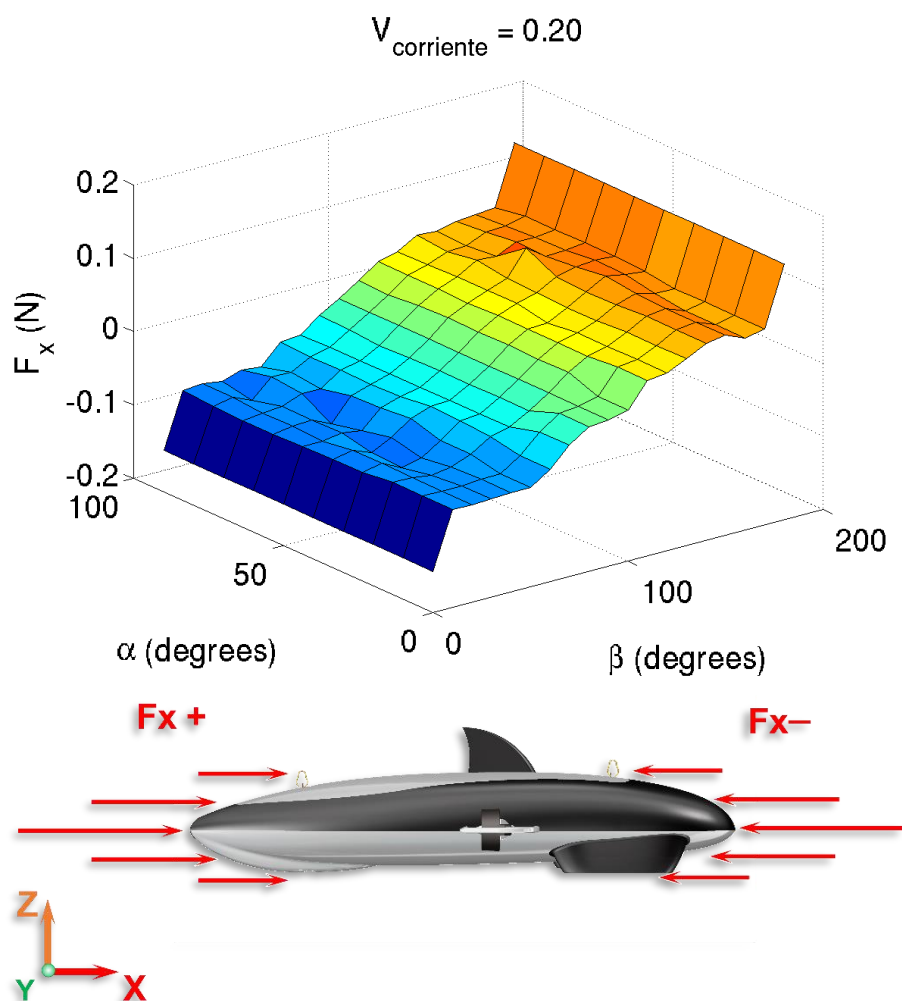


Figura 4-4 Componente de la fuerza hidrodinámica en el eje X

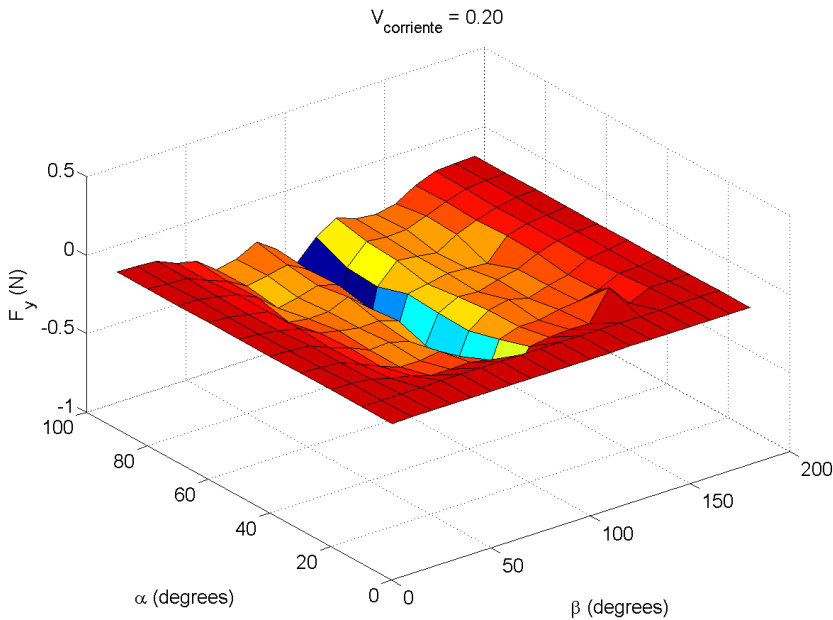
- Fuerza en Y**

En la *Figura 4-5* se muestra el comportamiento de la componente de la fuerza de arrastre en el eje Y, debido al cambio en el ángulo de incidencia, con $0^\circ > \alpha < 180^\circ$ los desplazamientos en el eje Y serán negativos, debido a esto en esta grafica 0 N se muestra como el valor más alto,

el comportamiento en desplazamiento positivo ($180^\circ > \alpha < 360^\circ$) será de igual magnitud pero en sentido contrario.

Con $\beta 90^\circ$ se tiene que las fuerzas de mayor magnitud y sentido negativo en el eje Y, esto debido a que la corriente incide completamente en el eje Y, de igual forma se presenta con $\beta 270^\circ$ donde se encontrará la magnitud más alta en sentido positivo.

Para el eje Y el pico más alto se presenta en la combinación $\alpha 90^\circ$ y $\beta 90^\circ$ (sentido negativo) y en $\alpha 90^\circ$ y $\beta 270^\circ$ (sentido positivo),



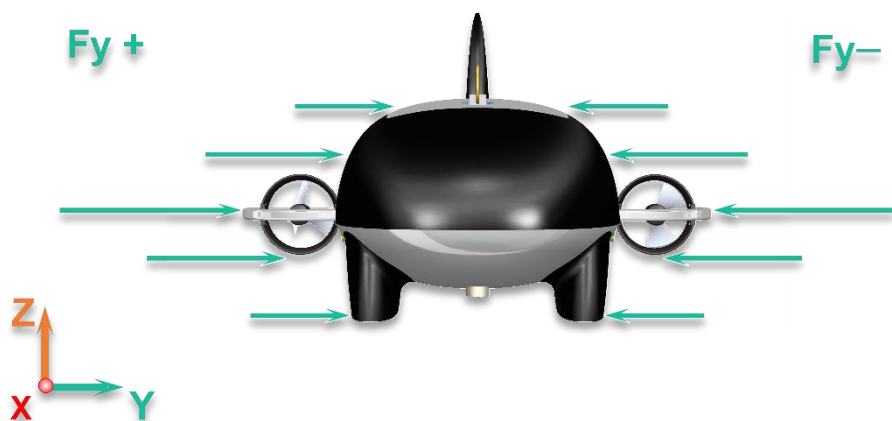


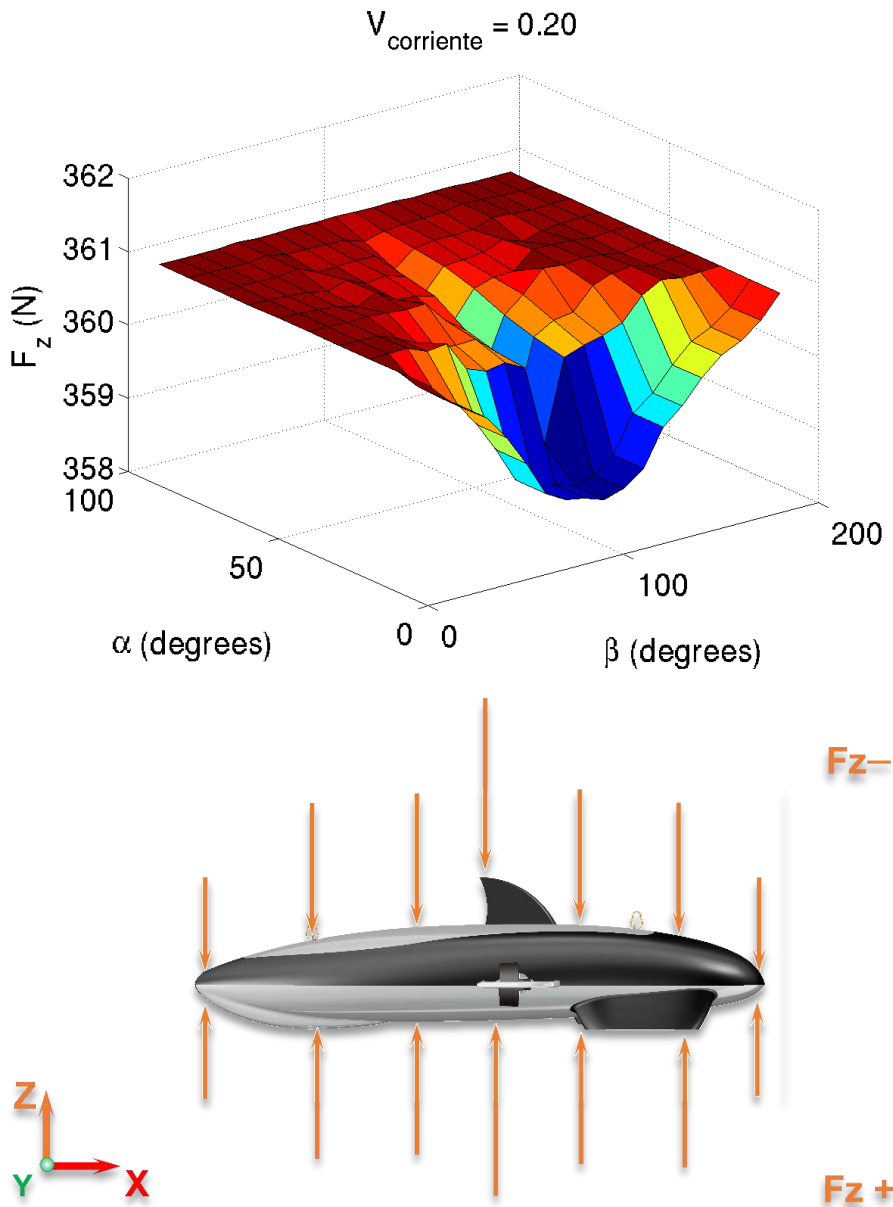
Figura 4-5 Componente de la fuerza hidrodinámica en el eje Y

- **Fuerza en Z**

Para analizar la *Figura 4-6* es importante tener en cuenta que en el eje Z actúa una fuerza debida a la flotación, esta fuerza compensa el peso del AUV y lo mantiene en equilibrio sin que llegue a hundirse o a flotar; debido a esto el valor máximo se encuentra con la magnitud de esta fuerza de flotación.

Con $0^\circ > \alpha < 90^\circ$ los desplazamientos en el eje Z serán negativos, el comportamiento en desplazamiento positivo ($90^\circ > \alpha < 270^\circ$) será de igual en magnitud, pero en sentido contrario.

Con $\alpha 0^\circ \beta 90^\circ$ se tiene que las fuerzas de mayor magnitud y sentido negativo en el eje Z y con $\alpha 180^\circ \beta 90^\circ$ para el sentido positivo. Esto se debe a que la corriente incide completamente en el eje Z.



4.2.2 Momentos debidos a la fuerza hidrodinámica

Dado que la fuerza hidrodinámica está aplicada en un punto diferente al centro de masas del AUV, se genera momentos debidos a esta fuerza, en *Figura 4-7* se presenta la distribución de los momentos en el casco del AUV.

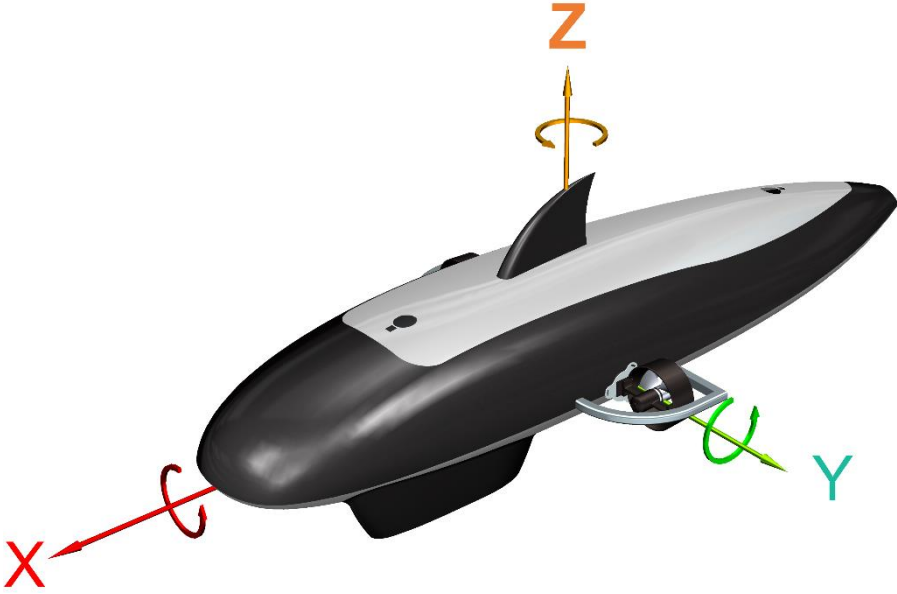


Figura 4-7 Momentos debidos a la hidrodinámica

Teniendo las distancias correspondientes se calculan dichos momentos con el siguiente determinante.

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ r_x & r_y & r_z \\ F_{dx} & F_{dy} & F_{dz} \end{bmatrix}$$

$$\vec{M}_x = F_{dz} * r_y - F_{dy} * r_z$$

$$\vec{M}_y = F_{dx} * r_z - F_{dz} * r_x$$

$$\vec{M}_z = F_x * r_y - F_y * r_x$$

Donde:

\vec{M} es el momento debido a la fuerza hidrodinámica

F es la magnitud de la fuerza hidrodinámica en el eje correspondiente

r es el punto de aplicación de la fuerza hidrodinámica en el eje correspondiente

- **Tau en X (Roll)**

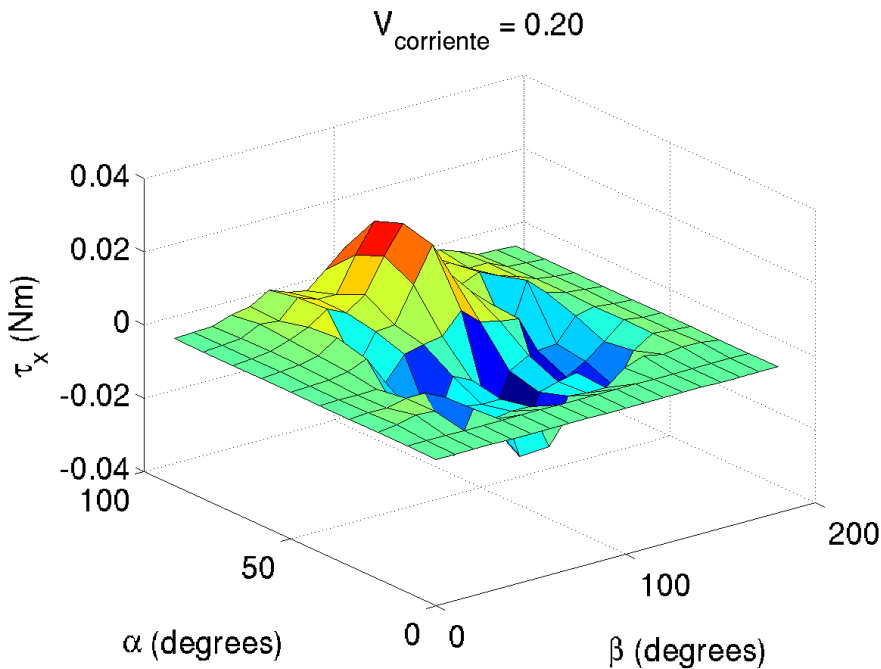


Figura 4-8 Momento debido a la fuerza hidrodinámica en el eje X (roll)

En la Figura 4-8 se puede ver como hay dos máximos para τ_x , ambos en $\beta 90^\circ$, esto se debe a la variación de las magnitudes en las fuerzas de arrastre en las componentes de Y, pues mientras una crece la otra decrece, es por eso que uno es negativo y otro positivo indicando el sentido del giro.

- **Tau en Y (Pitch)**

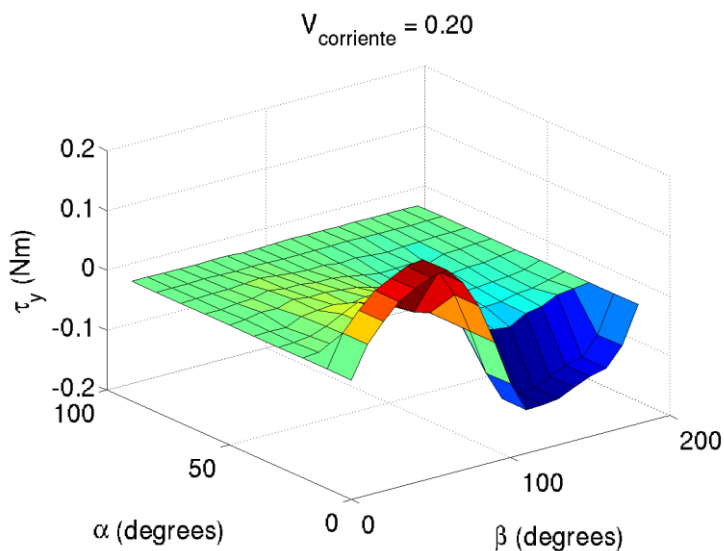


Figura 4-9 Momento debido a la fuerza hidrodinámica en el eje Y (pitch)

En la Figura 4-9 se puede ver como hay dos máximos para τ_y , uno positivo antes $\beta 90^\circ$ y otro negativo después, ambos cuando tiende a $\alpha 0^\circ$, este comportamiento corresponde a las variaciones de la magnitud de la componentes de la fuerza de arrastre en Z, que al ser de mayor magnitud que las de X determinan el giro de Y pitch.

- **Tau en Z (Yaw)**

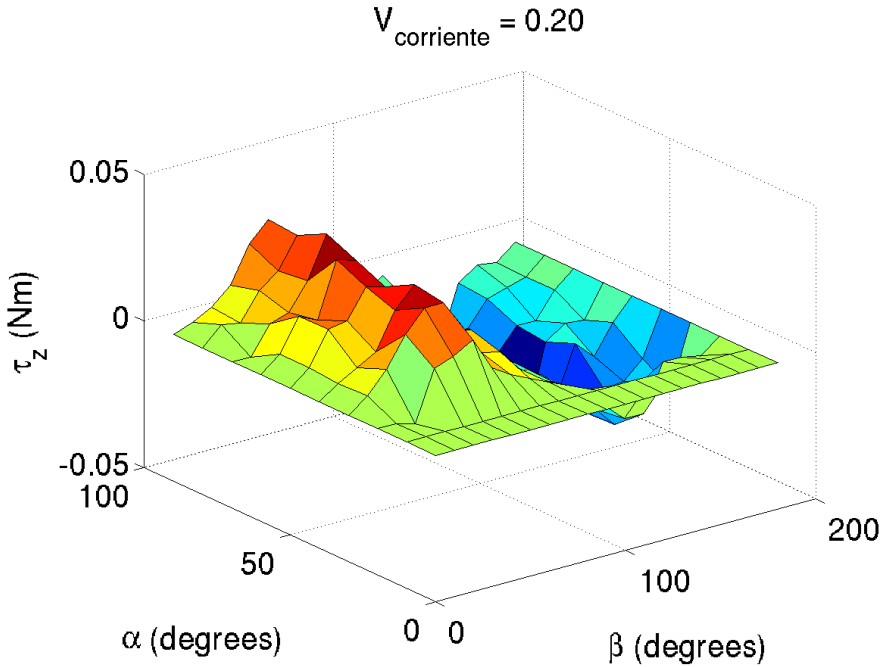


Figura 4-10 Momento debido a la fuerza hidrodinámica en el eje Z (yaw)

En la Figura 4-10, de la misma forma los valores de τ_z presentan dos máximos, uno positivo antes $\beta 90^\circ$ y otro negativo después, este comportamiento corresponde a las variaciones de la magnitud de las componentes de la fuerza de arrastre en Y, que al ser de mayor magnitud que las de X determinan el giro de Z yaw.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.3.1 Variación de la velocidad de la corriente

Con la implementación realizada en el modelado dinámico, es posible calcular y aplicar la fuerza de arrastre tanto en diferentes ángulos de incidencia, como con diferentes velocidades.

Entonces, con esta herramienta adicionalmente, es posible analizar la influencia que tiene la variación de la velocidad de la corriente, que incide en el casco del AUV.

En la *Figura 4-11* y la *Figura 4-12* se muestra la perturbación provocada por el aumento de la velocidad de la corriente, el efecto generado se ve reflejado tanto, en el desplazamientos lineal como angular del AUV. Se aprecia como la convergencia de las velocidades, se ve afectada a medida que la velocidad de la corriente aumenta.

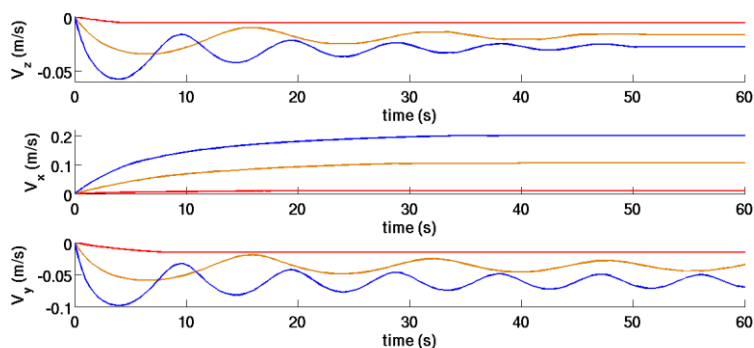


Figura 4-11 Velocidad y convergencia de los desplazamientos lineales

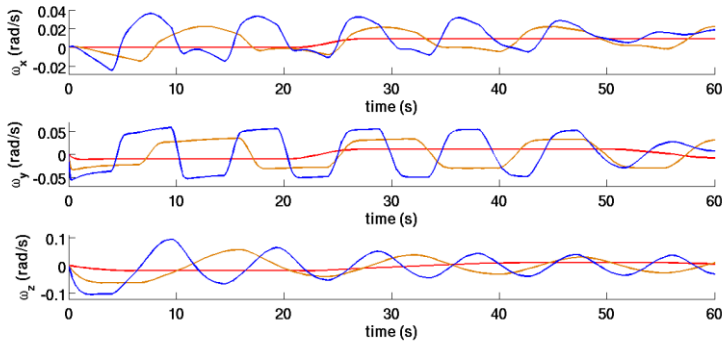


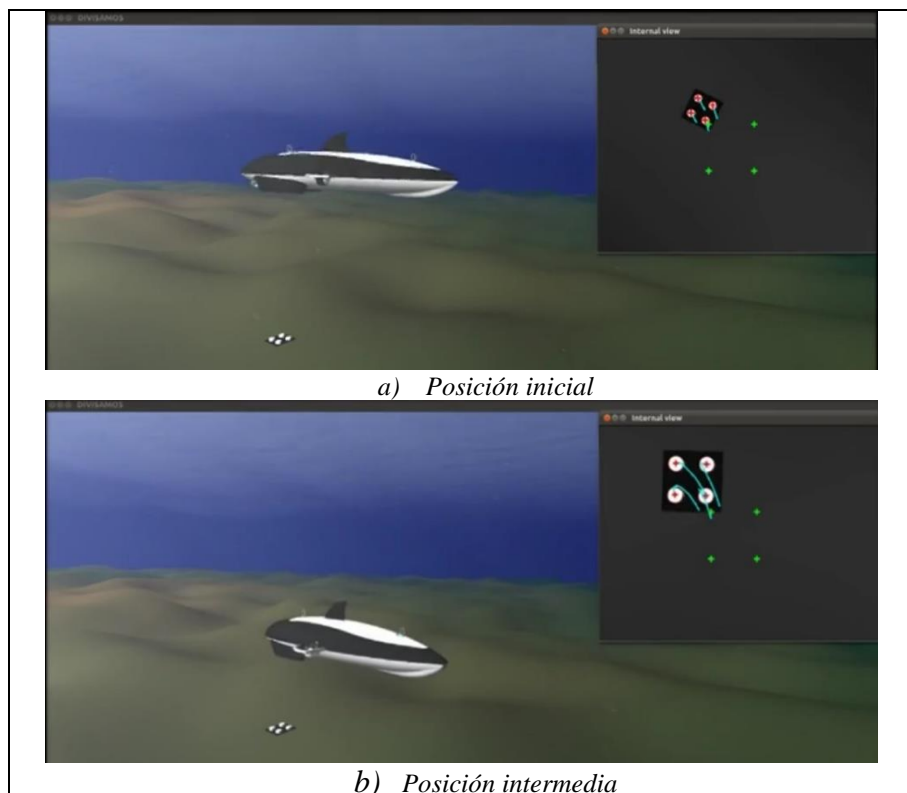
Figura 4-12 Velocidad y convergencia de los desplazamientos angulares

4.3.2 Resultados de las pruebas iniciales para la validación del modelo dinámico y cinemático

En el campo de la robótica subacuática se han hecho intentos de utilizar sensores de visión para el control. Sin embargo, la visión proporciona algunas características interesantes en comparación con los sensores de posicionamiento clásicos. Por ejemplo, las brújulas magnéticas sufren de una velocidad de actualización lenta y no se pueden usar cerca de estructuras pues estas afectan su lectura. Con la excepción de los sensores de profundidad, que son precisos y rápidos, los sensores de movimiento translacionales integrados, unen varios tipos sensores (acelerómetros, DVL registros de velocidad Doppler por sus siglas en inglés), todos estos utilizan mecanismos de cálculo basados en derivas; el resultado obtenido no es el adecuado para el mantenimiento de una posición en el vehículo. Por el contrario, una cámara no está sujeta a influencias magnéticas, ni realiza calculo que dependan de derivadas, por esta razón también se puede utilizar como sensor de posicionamiento absoluto local.

A pesar de su corto alcance (generalmente de 3 a 10 metros) y la necesidad de una gran potencia informática, el control visual (también llamado visual servoing) permite tareas muy diversas, como por ejemplo el mantenimiento de una posición o el seguimiento de tuberías lo cual permite hacer la inspección de las mismas.

En la *Figura 4-13* se puede observar un operación donde se implementan técnicas de Visual Servoing en dos dimensiones, específicamente se busca ubicar el ORCA 300 en una posición específica. Se observa unas cruces verdes que indican la posición inicial del ORCA 300, unas cruces rojas que indican la posición que se quiere alcanzar y en color cian se representa la trayectoria del ORCA 300.



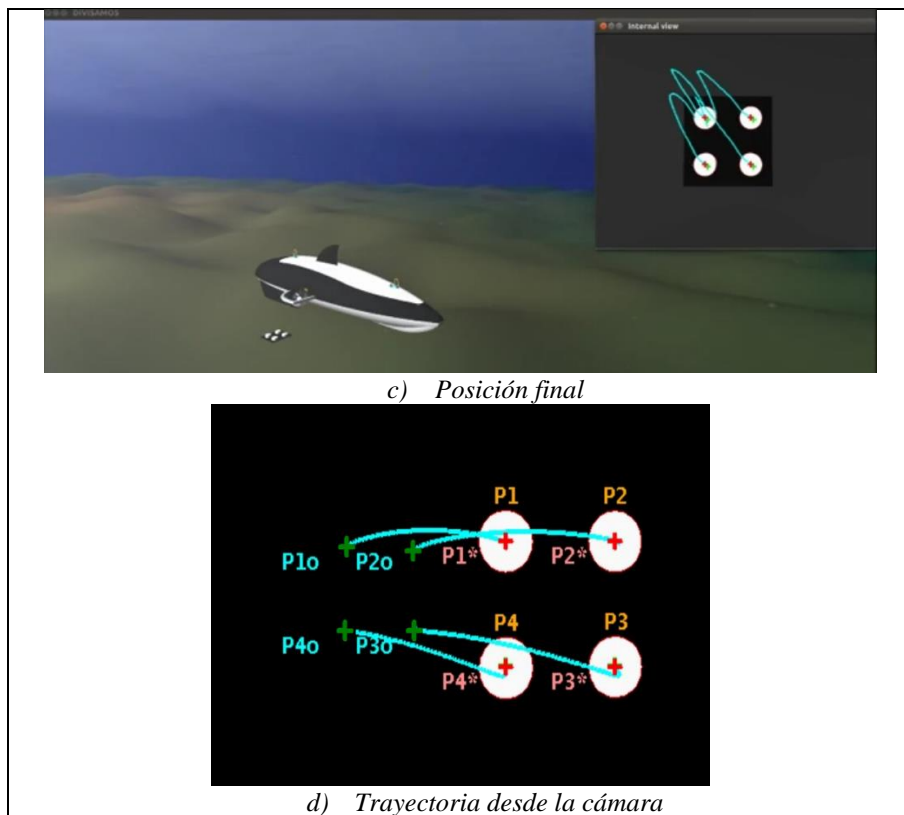


Figura 4-13 Visual servoing

La Figura 4-14 se puede observar la trayectoria del ORCA 300 con respecto a la posición deseada. En este caso, la posición deseada está relacionada con la coincidencia de cuatro puntos, pero es extensible a cualquier otra característica o marca que se programe para detectar.

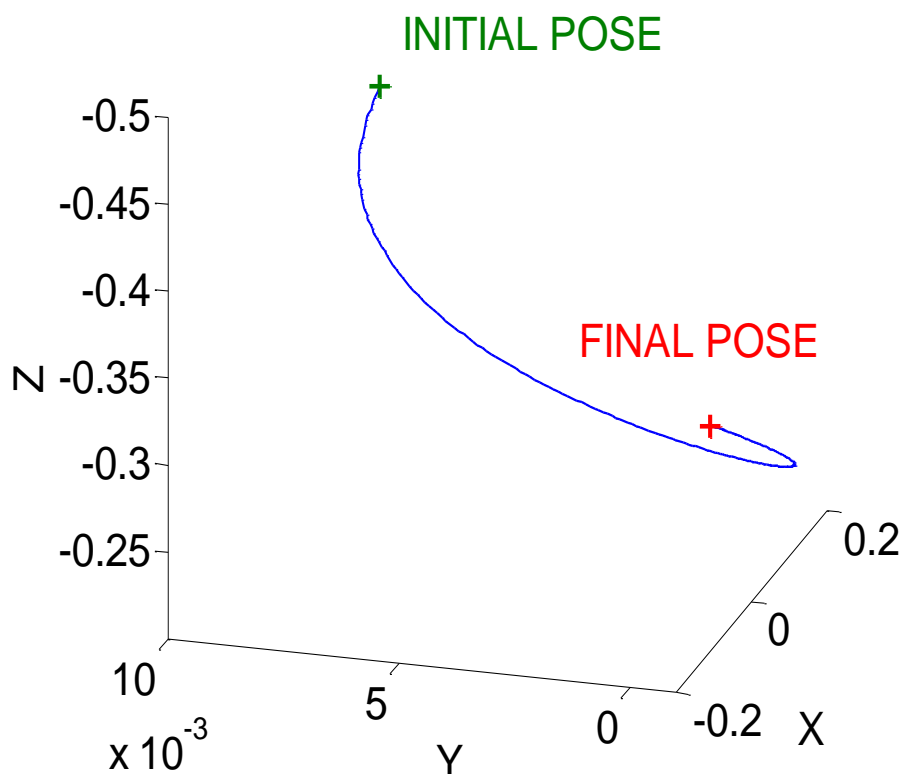


Figura 4-14 Posición del ORCA 300 con respecto al objeto deseado

La Figura 4-15 se muestra la acción de control y el error en la ejecución. Observe que debido a que el vehículo tiene solo 4 grados de libertad, no se pueden lograr todas las posiciones y el tiempo de convergencia depende de la pose.

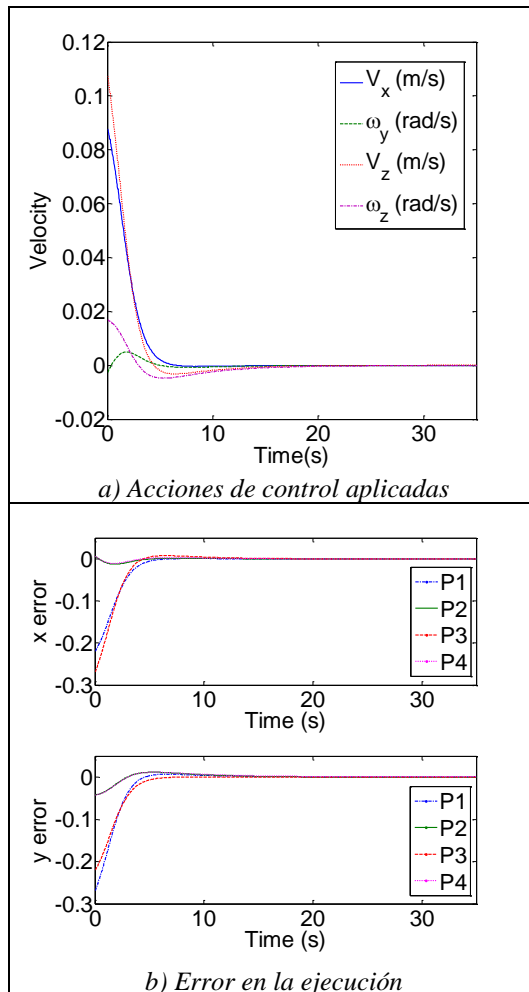


Figura 4-15 Acción de control

En la Figura 4-16 se presentan las pruebas iniciales realizadas, estas se hicieron en una piscina que instalamos en el Instituto de Diseño y Fabricación.



Figura 4-16 Comprobación con el ORCA 300

Capítulo 5

Resultados, participación en eventos científicos y publicaciones en revistas científicas

5 Resultados, participación en eventos científicos y publicaciones en revistas científicas

Los resultados alcanzados en el desarrollo de esta investigación se ven reflejados en la creación de documentos científicos que cumplieron con los parámetros de calidad exigidos en ámbitos como congresos y revistas científicas especializadas relacionadas con la ingeniería de forma general y de forma específica con la robótica submarina.

Dando alcance al objetivo general de esta tesis el cual era disponer de un vehículo submarino que contara con la posibilidad de ser equipado con diferentes sensores e instrumentación, además que tenga la capacidad de realizar múltiples misiones. Con este reto se obtuvieron cuatro artículos que posibilitaron la participación en dos congresos y la publicación en dos Journals.

La estricta búsqueda y análisis de resultados de proyectos de investigación que preceden a ésta investigación, culminó con la publicación de un artículo que agrupa las principales características del diseño mecánico, además con el valor agregado que dan las experiencias recogidas por las investigaciones de otros autores avaladas en el estado del arte de la robótica submarina.

El análisis de la influencia del fluido en el que se desplaza el AUV reviste diferentes problemas que deben ser analizados, la implementación de análisis CFD facilita y se aproxima mucho al comportamiento real del AUV, todo esto permitió el desarrollo de un artículo que fue publicado en una revista científica especializada en temas de ingeniería.

Con la culminación del diseño del AUV, se establecieron los parámetros que debería cumplir un AUV versátil, que ofrezca diferentes posibilidades para el desarrollo de misiones, todo esto teniendo en cuenta la instrumentación. Como resultado se realizaron dos artículos que fueron presentados en dos eventos científicos diferentes.

En los numerales 5.1 PUBLICACIONES EN REVISTAS CIENTÍFICAS 5.2 PARTICIPACIÓN EN EVENTOS CIENTÍFICOS, se presentan todos los resultados mencionados.

5.1 PUBLICACIONES EN REVISTAS CIENTÍFICAS

Con la participación activa en revistas científicas gracias a las publicaciones que se hicieron, fue posible dar a conocer los resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación medios de consulta internacional relacionados con el área específica de la robótica submarina.

International Journal of Oceans and Oceanography ISSN 0973-2667
Volume 11, Number 1 (2017), pp. 89-103 © Research India Publications
<http://www.ripublication.com>

State of the Art of Parameters for Mechanical Design of an Autonomous Underwater Vehicle

F. Aguirre; S. Vargas; D. Valdés; J. Tornero

Abstract

This work presents a guide for researchers interested in Ocean Engineering and Underwater Robotics design of Autonomous Underwater Vehicles (AUV). The main purpose of this review is to evaluate the present situation of underwater robotics; specifically of AUV's, in this review we integrated several existing AUV's. Data analysis was taken from 33 AUV's belong to sixteen different countries around the world, these AUV's have been study in 40 groups in universities, research institutes and business companies.

The state of the art is based on three main aspects: mission developed by the AUV's, conditions of operation and design of the hull. With this review the reader will have important information about AUV's; such as typical speed, maximum operating depth, navigation and communication systems, shapes and materials used in hull manufacture.

Based on this work, researchers in ocean engineering and robotic underwater, has the possibility to define parameters of operation of the AUV that wants to design, taking into account the type of missions they want to develop. The parameters used by other researchers will serve as a starting point for your own design and research, with that you will overcome the difficulties that other projects had to overcome. In this work are included all the possibilities of use of an AUV, for any design. All the information contained in this work has updated with the most recent published papers of each AUV.

Key words – Ocean Engineering, Underwater robotics, AUV, Mechanical design, hull shapes, hydrodynamics.

REFERENCES

- [1] González, A. G., et al, 2012, “Vehículo Submarino Autónomo para trabajos oceanográficos en aguas costeras”.
- [2] Yanwu, Z. E., 2010, In “Design and Tests of an Adaptive Triggering Method for Capturing Peak Samples in a Thin Phytoplankton Layerby an Autonomous Underwater Vehicle”.
- [3] Acosta, G., & Calvo, O. A., 2008, “Vehículo Autónomo Submarino para la inspección de tuberías y cables”. *V Jornadas Argentinas de Robótica*.
- [4] Acosta, G., et al, 2003, “Estrategia de búsqueda y seguimiento de objetos sobre el lecho marino con un vehículo submarino autónomo”. In *V Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*.
- [5] Alvarez, A., 2011, “Volumetric reconstruction of oceanographic fields estimated from remote sensing and in situ observations from autonomous underwater vehicles of opportunity”. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 36(1), 12-24.
- [6] Albiez, J., et al, 2010, “Adaptive AUV mission management in under-informed situations”. In *OCEANS 2010* (pp. 1-10). IEEE.

- [7] Furlong, M. E., et al, 2012, “Autosub Long Range: A long range deep diving AUV for ocean monitoring”. In *Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2012 IEEE/OES* (pp. 1-7). IEEE.
- [8] Cui, R., et al, 2012, “Synchronization of multiple autonomous underwater vehicles without velocity measurements”. *Science China Information Sciences*, 55(7), 1693-1703.
- [9] Faria, M., et al, 2014, “Coordinating UAVs and AUVs for oceanographic field experiments: Challenges and lessons learned”. In *Robotics and Automation (ICRA) 2014 IEEE*.
- [10] Ruiz Ortega, A. G., 2009, “Diseño de un sistema de control autónomo para un vehículo submarino AUV”.
- [11] Paull, L., et al, 2014, “AUV navigation and localization: A review”. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 131-149.
- [12] Techy, L., et al, 2011, “Long-baseline acoustic localization of the Seaglider underwater glider”. In *American Control Conference (ACC)*, IEEE.
- [13] Heidemann, J., et al, M., 2012, “Underwater sensor networks: applications, advances and challenges”. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 370(1958), 158-175.
- [14] Aguirre, F., et al, J., 2011, “Optimal design parameters of AUV hull based on CFD simulation”. *Instrumentation viewpoint*, (11)
- [15] Wei, Z., et al, 2014, “Analysis of the resistance performance for different types of AUV’s based on CFD”. *Chin J Ship Res*, 9, 28-37.
- [16] Joubert, P. N., 2004, “Some Aspects of Submarine Design Part 1. Hydrodynamics” (No. DSTO-TR-1622). *Defense science and technology organization Victoria (Australia)*.
- [17] Cheng, Y. X., et al, 2015, “Research on Composite Material Pressure Hulls Based on Approximation”. *Ship Engineering*, 4, 019.
- [18] Zhuoyi, Y., et al, 2014, “Structure design of an autonomous underwater vehicle made of composite material”. In *OCEANS 2014-TAIPEI* (pp. 1-4). IEEE.

- [19] Rahim, K. I. A., et al, 2011, "Pressure hull development using hybrid composite with metal liner concept". *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 40(2).
- [20] Brodsky, P., & Luby, J., 2013, "*Flight Software Development for the Liberdade Flying Wing Glider*". Washington Univ Seattle Applied Physics Lab.
- [21] Francis, A., et al, 2015, "An underwater robot mimicking jet propulsion inspired by feather sea star". In *Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, 2015 International Conference on (pp. 1-7). IEEE.
- [22] Rajamohamed, S., & Raviraj, P., 2015, "Bio-Inspired Swimming Techniques for Robotic Fish using Fow and Pressure Sensing Mechanism (Computational Bio-Mimetic)". *Indian Journal of Science and Technology*, 8(24), 1.
- [23] Ikeda, M., et al, 2014, "Motion Analysis of a Manta Robot for Underwater Exploration by Propulsive Experiments and the Design of Central Pattern Generator". *Int. J. of Automation Technology*, 8(2), 231-237.
- [24] Caffaz, A., et al, 2010, "The hybrid glider/AUV Folaga". *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 17(1), 31-44.
- [25] Boeing, A., & Bräunl, T., 2012, "Leveraging multiple simulators for crossing the reality gap". In *Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, 12th International Conference. IEEE.
- [26] Nishida, Y., et al, 2013, "Hovering type AUV "Tuna-Sand" and its surveys on Smith caldera in Izu-Ogasawara ocean area". In *Oceans-San Diego, 2013* (pp. 1-5). IEEE.
- [27] Copros, T., & Scourzic, D., 2010, "Alister—Rapid Environment Assessment AUV". In *Global Change: Mankind-Marine Environment Interactions*. Springer Netherlands.
- [28] Sheikh, A. A., et al, 2016, "Challenges and opportunities for underwater sensor networks". In *Innovations in Information Technology (IIT)*, 12th International Conference IEEE.

- [29] Ohata, S., et al, 2007, “AquaBox series: small underwater robot systems for shallow water observation”. In *Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. Symposium on* (pp. 314-319). IEEE.
- [30] Fritz, J. R., 2013, “Computer-aided detection of rapid, overt, airborne, reconnaissance data with the capability of removing oceanic noises”. Naval Postgraduate School Monterey Ca.
- [31] Barisic, M., et al, 2012, “Sigma-point Unscented Kalman Filter used for AUV navigation”. In *Control & Automation (MED), 20th Mediterranean Conference IEEE*.
- [32] Palomeras, N., et al, 2014, “Autonomous I-AUV docking for fixed-base manipulation”. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 12160-12165.
- [33] Copros, T., & Scourzic, D., 2010, “Alister–Rapid Environment Assessment AUV”. In *Global Change: Mankind-Marine Environment Interactions*. Springer Netherlands.
- [34] Szyrowski, T., et al, 2013, “Developments in subsea power and telecommunication cables detection: Part 2–Electromagnetic detection”. *Underwater Technology*, 31(3), 133-143.
- [35] Ernits, J., et al, 2010, “Automatic fault detection and execution monitoring for AUV missions”. In *Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 2010 IEEE/OES*.
- [36] Yu, Y., & Cheng, Z. X., 2013, “The Application of Artificial Intelligence in Ocean Development”: In the View of World Expo 2010. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 347)
- [37] Elvander, J., & Hawkes, G., 2012, “ROV’s and AUV’s in support of marine renewable technologies”. In *Oceans, 2012* (pp. 1-6). IEEE.
- [38] Taylor, M., & Wilby, A., 2011, “Design considerations and operational advantages of a modular AUV with synthetic aperture sonar”. In *OCEANS 2011* (pp. 1-6). IEEE.
- [39] Helgason, B., 2012, “Low speed modeling and simulation of Gavia AUV”.

- [40] Reshmi, K. R. G., et al, 2016, “Modelling and Analysis of Autonomous Underwater Vehicle for Depth Control”. *International Journal of Engineering Science*, 7212.
- [41] Vasilijevic, A., et al, 2014, “Monitoring of seagrass by lightweight AUV: A *Posidonia oceanica* case study surrounding Murter island of Croatia”. In *Control and Automation (MED), 22nd Mediterranean Conference of* (pp. 758-763). IEEE.
- [42] Mascarenhas, A. A., et al, 2012. “An autonomous underwater vehicle" Maya", for monitoring coastal waters, estuaries, rivers and dams”.
- [43] Packard, G. E., et al, 2013, “Continuous autonomous tracking and imaging of white sharks and basking sharks using a remus-100 AUV”. In *Oceans-San Diego, 2013* (pp. 1-5). IEEE.
- [44] Bellingham, J. G., 2014, “Have robot, will travel”. *Methods in Oceanography*, 10, 5-20.
- [45] Kottege, N., 2011, “Underwater acoustic localization in the context of autonomous submersibles”.
- [46] Townsend, N., 2016, “In situ results from a new energy scavenging system for an autonomous underwater vehicle”.
- [47] Petrich, J., & Stilwell, D. J., 2011, “Robust control for an autonomous underwater vehicle that suppresses pitch and yaw coupling”. *Ocean Engineering*, 38(1), 197-204.
- [48] Javaid, M. Y., 2014, “Underwater Gliders: A Review. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 13, p. 02020). EDP Sciences.
- [49] Gafurov, S. A., & Klochkov, E. V., 2015, “Autonomous unmanned underwater vehicles development tendencies”. *Procedia Engineering*, 106, 141-148.
- [50] Tran, N. H., 2014, “Navigation and depth control of a small-sized AUV with mass shifter mechanism”. In *The International Ocean and Polar Engineering Conference*. (ISOPE).

HYDRODYNAMIC FORCE CALCULATION OVER AN AXISYMMETRIC AUV WITH CON- STANT OCEAN CURRENTS AT LARGE RANGE OF ANGLES OF ATTACK

F. Aguirre; S. Vargas y J. Tornero

Abstract

Mobile robotics has allowed remote exploration of terrestrial, aerial and aquatic environments; environments that present conditions that a human could not resist, some of these conditions are: extreme temperatures; very low or very high, high pressures and perform surveillance without being detected among others. The incorporation of robots in these activities significantly reduces the risk to which a human would be exposed in these environments. In aquatic environments, specifically in the sea there are water currents that interfere in the development of missions such as data acquisition or repair of structures, these currents impact the robot and make it difficult to maintain a position that allows the mission to be adequately developed. The application of a control strategy that allows keeping the robot in a position requires knowledge of the magnitude of the Hydrodynamic Force generated by the marine current, on the other hand, for the movement of the robot it is necessary to know how the magnitude of the Hydrodynamic Force varies in all positions.

This work was performed on a symmetric Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Hull in the X-Y and X-Z planes in a range of attack angles

from 0° to 180°. In this article a series of simulations was developed through Computer Fluid Dynamics (CFD). This method allowed to observe three zones in the graph of the hydrodynamic coefficient (C_H) according to the angle of attack ($0^\circ \leq \theta \leq 25^\circ$, $20^\circ < \theta \leq 90^\circ$ y $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$), for each of these zones a correlation was proposed empirical polynomial of third order to obtain the magnitude of the Hydrodynamic Force (f_H). The simulations were performed for a Reynolds number of 1.8×10^6 , based on the diameter of the Hull. This methodology is proposed as a solution to evaluate in an agile and satisfactory way the Hydrodynamic Force for different orientations between the vehicle studied and the flow.

Key words – hydrodynamics force, hydrodynamics coefficient, angle of attack, marine current, hull, autonomous underwater vehicle.

REFERENCES

- [1] Hoerner, S. F. (1965). Fluid-dynamic drag: practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance (p. 598). Midland Park, NJ: Hoerner Fluid Dynamics.
- [2] Johnson, R. W. (Ed.). (2016). Handbook of fluid dynamics. Crc Press.
- [3] de Barros, E. A., Dantas, J. L., Pascoal, A. M., & de Sá, E. (2008). Investigation of normal force and moment coefficients for an AUV at nonlinear angle of attack and sideslip range. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 33(4), 538-549.
- [4] Chen, C. W., Kouh, J. S., & Tsai, J. F. (2013). Modeling and simulation of an AUV simulator with guidance system. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 38(2), 211-225.

- [5] Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2014). Handbook of unmanned aerial vehicles. Springer Publishing Company, Incorporated.
- [6] Aguirre F.; Vargas S.; Valdés D. and J. Tornero (2017) International Journal of Oceans and Oceanography, ISSN 0973-2667 Volume 11, Number 1, pp. 89-103
- [7] Zhang, H. X., & Pan, Y. C. (2006). Application CFD to compare submarine hull forms. Journal of Ship Mechanics, 10(4), 1.
- [8] Miller, T. F., Gandhi, F. S., & Rufino, R. J. (2014). Morphing hull concept for underwater vehicles. Ocean Engineering, 92, 92-102.
- [9] Aguirre, F., Grau, F., & Tornero, J. (2011). Optimal design parameters of AUV hull based on CFD simulation. Instrumentation viewpoint, (11), p18.
- [10] Stevenson, P., Furlong, M., & Dormer, D. (2007, June). AUV shapes-combining the practical and hydrodynamic considerations. In Oceans 2007-Europe (pp. 1-6). IEEE.
- [11] Xuliang, Y., Lingwei, M., Feng, W., & Xiaoli, N. (2016, April). Investigation of thrust and load characteristics of AUV propeller under the condition of different angle incoming flow. In OCEANS 2016-Shanghai (pp. 1-5). IEEE.
- [12] Yun, alexander, (2017). Computational fluid dynamics: from zero to guru, First edition, CreateSpace Independent Publishing Platform, Los Angeles, USA.
- [13] Yuan, Y. O., Zurek, B., Liu, F., deMartin, B., & Lacasse, M. D. (2017, December). Numerical comparisons of ground motion predictions with kinematic rupture modeling. In AGU Fall Meeting Abstracts.

- [14] Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2018). Computational fluid dynamics: a practical approach. Butterworth-Heinemann.
- [15] Zangeneh, R., & Ollivier-Gooch, C. F. (2017). Mesh optimization to improve the stability of finite-volume methods on unstructured meshes. *Computers & Fluids*, 156, 590-601.
- [16] ANSYS. (2018). Fluent 18.1 user's guide. ANSYS FLUENT Inc.
- [17] Ahsan, S. N., & Aureli, M. (2017). Three-dimensional analysis of hydrodynamic forces and power dissipation in shape-morphing cantilevers oscillating in viscous fluids. *International Journal of Mechanical Sciences*.
- [18] d'Amore-Domenech, R., Raso, M. A., Villalba-Herreros, A., Santiago, Ó., Navarro, E., & Leo, T. J. (2018). Autonomous underwater vehicles powered by fuel cells: Design guidelines. *Ocean Engineering*, 153, 387-398.
- [19] Hang Hou, Y., Liang, X., & yang Mu, X. (2018). AUV hull lines optimization with uncertainty parameters based on six sigma reliability design. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*.
- [20] Ponta, F. L., & Jacovkis, P. M. (2008). Marine-current power generation by diffuser-augmented floating hydro-turbines. *Renewable energy*, 33(4), 665-673.

5.2 PARTICIPACIÓN EN EVENTOS CIENTÍFICOS

Con la participación activa en eventos científicos gracias a las ponencias que se hicieron, fue posible dar a conocer los resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación en congresos relacionados con el área específica de la robótica submarina.

WMTC2012 World Maritime Technology Conference, (May 29-June 1, 2012), Saint-Petersburg, Russia

THE COMPLETE DESIGN OF THE ORCA 300-AUV

F. Aguirre; A. Muñoz; P. Muñoz; J. E. Solanes; V. Girbés; V. Colomer; L. Armesto; J. Tornero

ABSTRACT

Preserving marine and continental waters requires the development of new techniques, technologies and devices able to explore different habitats with the goal of protecting and managing them. The paper covers the design and construction of a hydrodynamically and hydrostatically efficient mechanical submarine that can be unmanned or partially teleoperated. The design of the submarine was based on fluid dynamics (CFD) simulations using finite element analyses. The most hydrodynamically efficient shape was of the water drop as well as the orca, which consist of an ellipsoidal front part and paraboloid rear part. The paper provides an overview of a research project in maritime technology (DIVISAMOS), which is involved in the analysis of ocean waters, as well as for monitoring the sea bed in both civil and military purposes. In particular, the analyses of habitat degradation and biodiversity reduction caused by toxic substances as well as of seaboard erosion caused

by construction at harbor areas. Our contribution to this field can be divided into two aspects: the introduction of a methodology for the design and construction of low-cost submarines based on affordable components and new materials; in addition to the application of research experience in auto-guided terrain vehicles to maritime technology.

Keywords: Submarine, Design based on CFD, Manufacturing using new materials, Low-cost vehicles, Teleoperation and Human Machine Interfaces, Hydrodynamic Modeling, Multifrequency Visual Servoing, Line-tracking, Oceanographic Missions, Marine Technology.

INTRODUCTION

Preserving marine and continental waters requires the development of new techniques, technologies and devices able to explore different habitats with the goal of protecting and managing them. In this regard, hardware architecture and sensor/control software are developed in addition to an autonomous navigation system for submarine vehicles along with a water quality monitoring system as well as other batimetry mapping applications for aquatic ecosystems with high resolution geo-referenced data and cartographic projection of the sea bed.

At present, the use of autonomous vehicles is growing especially in applications such as manufacturing, hazardous materials handling, surveillance, etc. The basic task in such application is the perception of the environment through one or several sensors. The processing of sensor input signals generates particular representations of unknown environment, which can then be used to navigate and control the vehicle. Therefore, autonomous vehicle navigation in unknown environment is challenge that many researchers have tackled over the years.

In this paper, the design and manufacture of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) called

ORCA300-AUV is fully described, in addition to the research project that support activities based on this vehicle. The project is DIVISAMOS (“Diseño de un Vehículo de Inspección Submarina Autónoma para Misiones Oceanográficas”). See 0.

The ultimate objective of DIVISAMOS is to have an underwater auto-guided and partially teleoperated vehicle that can be fitted with a variety of sensors and instrumentation to perform a variety of missions, mainly for analysis of ocean waters, but also for monitoring in both civil and military facilities.

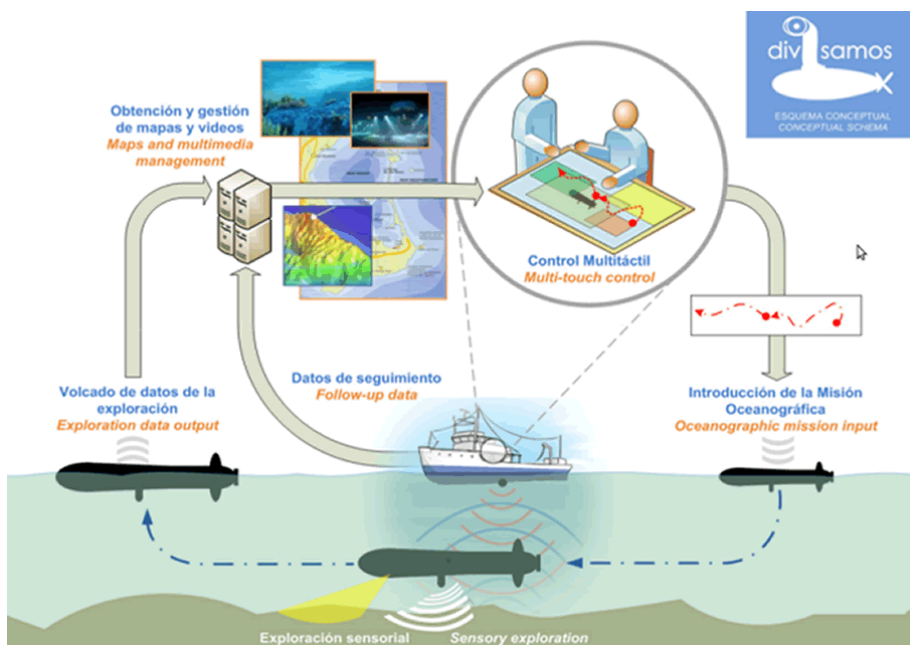


Fig. 1 Project overview.

The definition of the oceanographic missions to be carried out has influenced the design of the ORCA300-AUV. In turn pilot/end user-friendly requirements will guide the design of an innovative multi-touch interface, which should simplify the process of visualization and overall

teleoperation of the system. The navigation and control system developed will enable the submarine vehicle to perform tasks such as: supervision and surveillance of the sea bed, search and rescue operations, mine cleaning, surface inspection of ships, oil platforms, bridge and dam inspection and the localization of sunken ships, among others.

The ORCA300-AUV, designed by a team of researchers from the Institute of Design and Manufacturing of the Technical University of Valencia, has properties such as 1) hydrodynamic efficiency which reduces the drag force; 2) ability to remain suspended (hovering), which allows more precise analysis of the environment; 3) versatility supporting a wide range of sensors, intelligent architecture, etc. In addition it is possible to install an extensive range of electrical devices.

The design is based on the calculation of drag forces on the hull for stability and fluid dynamic resistance using standard CAD and CAE tools. The hull is analyzed based on the effect of the apparent current around the vehicle, using spherical coordinates.

ORCA300-AUV has four thrusters that allow maneuvering and control of 4 degrees of freedom, a control unit and navigation system composed of a computer, an inertial navigation sensor and a power supply unit made of lithium batteries, in addition to sensors such as two cameras for stereoscopy vision, a sonar, and inertial sensors among others.

A dynamical model of the AUV has been developed using the computed forces previously obtained. Based on that model, it is possible to simulate the effect of the vehicle within strong currents for different distributions of internal loads as well as appropriate control techniques to guide the vehicle under such conditions.

CONTEXT

The basic equipment for sensors in AUV is designed according to the missions. Here, a solutions is proposed that enables the provide equipment or services to governments (autonomous regions) to facilitate compliance with three directives: 1) Directive 2000/60/EC of the European Parliament and the Council of 23 October 2000 by which establishes a framework for Community action in the field of water policy, known as the WFD (Water Framework Directive), 2) Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and wild fauna and flora, and 3) Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 on the protection of waters against pollution caused by nitrates from agriculture.

The **Directive 2000/60/EC of the European Parliament** provides for the "submerged vegetation", "phytoplankton" and "benthic macroinvertebrates" as biological indicators of ecosystem status. It passes the ancient concept of mediated contamination thresholds of chemicals indicators to assess the health of aquatic ecosystems through the presence and condition of the organisms present.

The **Council Directive 92/43/EEC** establishes the need to classify and monitor submerged habitats in coastal waters to monitor the possible changes due to action taken by the man on the coast. The AUV is equipped with an underwater camera equipment to enable the collection and systematic review of the vegetation, both quantitatively (in surface) and qualitative (species of vegetation present) to be able to identify taxonomically algae and flowering present through photographs. Posidonia meadows are a type of ocean ecosystems of particular interest because it is a unique species whose Mediterranean grasslands are in decline due to changes in the ecosystem by discharges through emissaries such as the Brine desalination plants or turbidity by inputs from other earth materials. This work is now carried out by teams of divers who

perform visual lifting transect mapping vegetation cover implying an enormous personal effort that does not allow monitoring over the long term. With the availability of an AUV to be a low cost and high frequency display the evolution of Posidonia meadows and prediction of possible environmental conditions to receive an early warning. The directive also requires the measure of abundance of phytoplankton. An approximation of this abundance is given by the chlorophyll concentration is measured with a fluorometric sensor installed on the probe-YSI 6600V4 to be installed on your computer. A second phase prepares the AUV in order to have a flow cytometer type FlowCAM or CitoBuoy allowing the collection of photographs of individual cells. The AUV also can be used for in situ observation of the benthic fauna of which will use the third indicator set in the directive. Using a fixed position in XYZ coordinates the AUV can see certain areas of the fund subject to rapid change in this type of fauna. A specific application would be monitoring and monitoring of the macroinvertebrate fauna in the deep of the aquaculture fish cages where excess food and the deposition of the bodies themselves are an input of organic matter that requires the facilities to move elsewhere not to exceed certain thresholds from which the communities of organisms would be irreversible.

The **Council Directive 91/676/EEC** requires member countries to identify areas vulnerable to nitrate pollution and to take appropriate measures to ensure that it does not exceed the threshold of 50 mg / l. At present this work is developed through sampling vessels and subsequent chemical analysis of them. The new generation of sensors based on ultraviolet spectroscopy, to detect the concentration of nitrate in situ without the need for sampling and chemical analysis. Nitrate sensitive areas include coastal lagoons and bays. In particular, the Mar Menor is an ecosystem whose process of eutrophication is due basically to the discharge of nitrates from intensive agriculture in its catchment area, the Campo de Cartagena. One of the manifestations of excess nitrates and

/ or organic matter in a water body is the decrease in dissolved oxygen concentration reached in cases established a pronounced hypoxia or anoxia when oxygen disappears completely. The deficit of oxygen in the water and / or sediment leads to the suffocation of wildlife to disappear quickly and place the mass mortality of fish affected by lack of oxygen.

PROJECT OVERVIEW

The project was structured in two phases. In the first phase, the following actions were carried out:

- Design and introduce an innovative neurobiologically inspired sensorisation and control structure to provide autonomy for submarine vehicles. Neurobiologically inspired algorithms should permit better adaptation of the vehicle to different environments, making missions more robust.
- Update a submarine provided by the Spanish Navy with a new sensorisation and control system to adapt it for use in civil submarine inspection missions.
- Develop an online self-localization application using geo-referenced sonar maps and vision mapping with onboard cartography.
- Implement multi-frequency sampling techniques applied to control, data merging, self-localization and 3D reconstruction.
- Develop friendly Human Machine Interfaces (HMI) of the data-based for the graphic handling on multi-touch screens coexisting with haptic devices, in addition to making wide use of multimedia (video) information in the context of analysis and evaluation of the mission.

In the second phase, the following actions were also carried out:

- Design a prototype of a submarine vehicle for civil missions, using standard CAD software.
- Select an appropriate design model based on manoeuvrability, accessibility, stability and fluid-dynamic resistance.

- Analyze possible prototypes in order to evaluate different hull shapes, appropriate to specific oceanographic missions, using standard CAE software.
- Manufacture a low cost prototype based on compound materials. The mold was first built using a robot cell with CAD/CAM/Robotics integration techniques.
- Extensively evaluate the submarine vehicle functionalities based on its performance during the specific missions.

The most relevant innovations of this project were:

- The design of an autonomous vehicle specifically adapted to data-logging for civil oceanographic missions.
- The integration of functionalities in terms of control, self-guidance, etc., allowing unmanned or partially teleoperated missions.
- The design and implementation of friendly interfaces for the graphic handling of data- base using multi-touch screens enabling a wide use of multimedia (video) information for detailed analysis of missions and subsequent evaluation.
- On-line self-localization application for the submarine vehicle using geo-referenced sonar maps with onboard cartography.
- Multifrequency techniques for data merging, self-localization and mapping (SLAM), line-tracking and generation of 3D cartographic maps.

AUV NAVIGATION

Conventional AUV navigation technologies are deeply studied in [0]. It classifies the three primary methods for navigation as: dead-reckoning and inertial navigation systems, acoustic navigation and geophysical navigation techniques.

DEAD RECKONING AND INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

The most obvious and longest established navigation technique is to integrate the vehicle velocity in time to obtain new position estimates.

Measurement of the velocity components of the vehicle is usually accomplished with compass and water speed sensor. The principal problem is that the presence of water current will add a velocity component to the vehicle which is not detected by the speed sensor. Consequently, dead reckoning for power-limited AUVs, operating at small speeds (3-6 knots), involving water-relative speed measurements can generate extremely poor position estimates.

In inertial navigation systems, the accelerations of the vehicle are integrated twice in time to derive the updated position. The inertial measurement unit (IMU) consists of orthogonal triads of gyros and accelerometers. Modern IMUs generally make use of a strap-down configuration where the IMU sensors are strapped rigidly onto the vehicle body - no gimbals. An IMU outputs change in velocity and change in attitude, often referred as delta v's (ΔV 's) and delta θ 's ($\Delta \theta$'s). IMU data output frequency is typically 100-3000Hz. IMU's range in performance from low cost MEMS devices to state-of-the-art Ring Laser Gyro (RLG) or Fiber Optic Gyro (FOG) based systems.

For operations near the seabed, Doppler Velocity Sonar (DVS) sensors can be used to measure the vehicle's velocity relative to the ground. The integration of this information in the navigation Kalman filter can greatly improve performance. For example, DARPA UUV, developed by Draper Laboratories, uses integrated INS/DVS system.

The problem with exclusive reliance on dead reckoning or inertial navigation is that position increases without bound as the distance traveled by the vehicle increases. Radio and satellite navigation systems can provide an accurate position update if the vehicle can travel at or near the surface periodically for a position fix.

In [0] a combined GPS/INS navigation system is developed, to demonstrate the feasibility of using a low-cost strap-down Inertial Measurement Unit (IMU) to navigate between intermittent GPS fixes.

ACOUSTIC NAVIGATION

Acoustic energy propagates well under the water, and hence acoustic transponders can be used as “beacons” to guide the motion of an AUV without the need for resurfacing. Two types of systems have been primarily employed: long baseline (LBL) and ultra-short baseline (USBL). Both systems employ external transducers or transducer arrays as aids to navigation. Errors in both LBL and USBL arrays come from many sources, which can be broken down into two primary categories: errors in the assumed array geometry or improperly surveying the relative and/or geodetic position of the array beacons. In the event that only local navigation is desired, then only relative beacon positions are relevant. If the navigation is to be geodetic-referenced, then the beacons must be located globally as well. A significant difficulty in acoustic navigation can be caused due to errors in the assumed local sound speed.

GEOPHYSICAL NAVIGATION

One approach to globally-referenced position estimation is to use measurements of geophysical parameters, such as bathymetry, magnetic field or gravitation anomaly. These approaches are based on matching sensor data on an a priori environment map.

AUV navigation based on bathymetric data has been successfully achieved by Bergem [0]. In this system, depths are measured at different angles using a multibeam sonar. This gives an accurate profile of the sea floor, and the absolute position is determined by matching this profile against an a priori known detailed bathymetric map of the actual area.

FULLY AUTONOMOUS AUVs

Nowadays, underwater navigation is normally done by using external assistance: long baseline (LBL) or ultra-short baseline (USBL) or GPS. The development of fully autonomous underwater vehicles (AUVs) is a challenging problem to the research community. A key problem among them is to navigate in an unknown unstructured underwater environment with limited sensing technologies.

MECHANICAL DESIGN

ORCA300-AUV has been designed based on hydrodynamics tests giving an innovative shape that combines controllability at low and high speeds and the ability to hover at a specific location above the sea-bed.

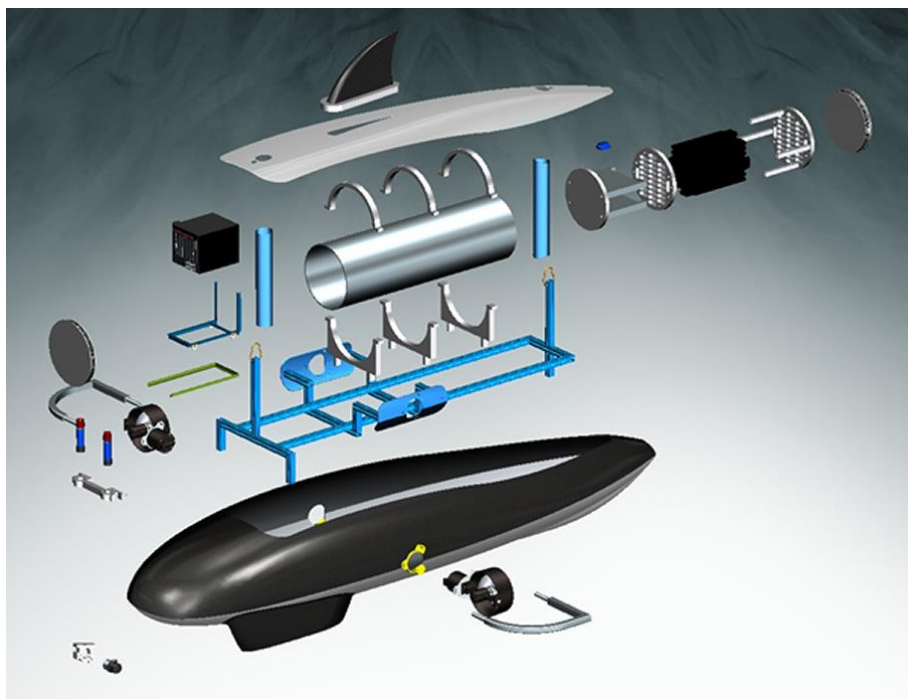


Fig 2 Component diagram

This is because ORCA3000-AUV has 2 vertical thrusters for controlling the displacement on Z axis (heave) and the turn on the Y axis (pitch), in addition to 2 horizontal thrusters for controlling the displacement on X axis (surge) and the turn on the Z axis (yaw). See 0.

The ORCA300-AUV has 2 hulls; an external hull with hydrodynamic characteristics, reducing drag forces and an internal hull resisting the hydrostatic pressure. The internal hull houses electronic and computational components including the control unit, in addition to the power supply unit.

Both hulls are connected through an aluminum structure designed also for attaching different sensors and other components. That structure allows different configurations of sensors and measurement devices in order to adapt to the requirements of any mission assigned to the AUV.

HYDRODYNAMIC HULL (EXTERNAL)

To reduce the drag force generated due to displacement of AUV, hydrodynamic analyses were carried out. Based on the common design parameters for an AUV hull [0], the ideal shape was determined, resulting in the hull shown in 0.

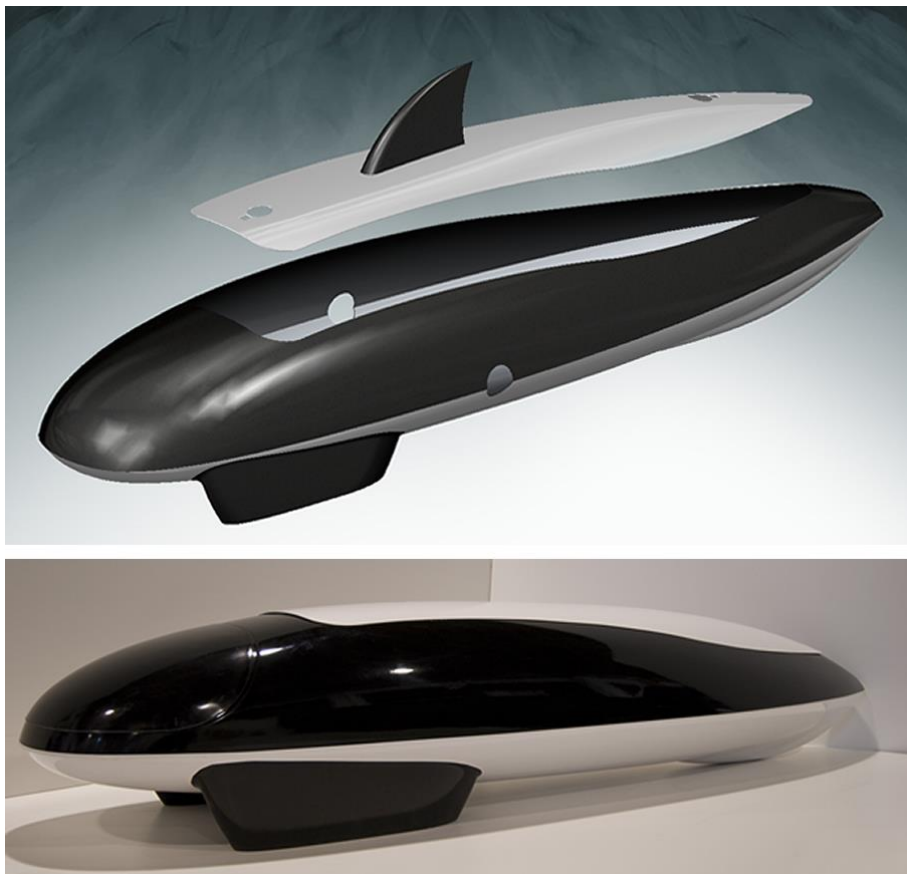


Fig. 3 Hydrodynamic hull

Fiberglass was used in the manufacturing of the hull. This material is used in the marine environment because it allows the necessary shape and surface finish for efficient hydrodynamic performance. The mold and the manufacturing process of the hull are shown in 0.



Fig. 4 Manufacturing process of the hull

HYDROSTATIC HULL (INTERNAL)

To guarantee the proper functioning of the control unit, the power supply unit, and electronics installed, it was necessary to create a water-proof space in order to resist hydrostatic pressure, as well as allow heat transfer through the metal wall.

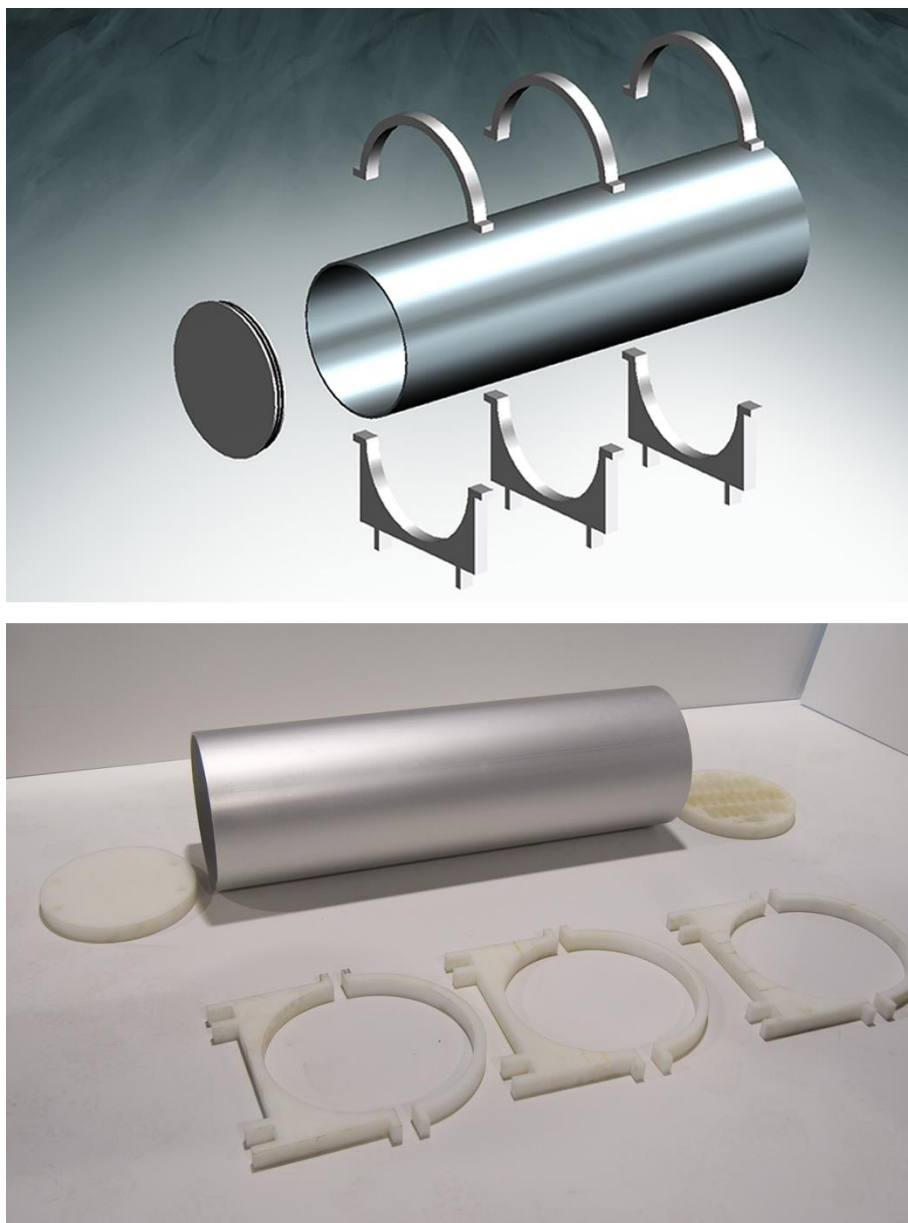


Fig. 5 Hydrostatic hull

In the manufacture of the hydrostatic hull, anodized aluminum was used, which allows better resistance of the marine environment conditions. In addition, the heat transfer coefficient of the aluminum allows internal heat to be transferred easily to the environment, the mechanical strength to resist hydrostatic pressure and the low density of the aluminum reduces the weight of the AUV.

The cylindrical internal hull is closed with a circular plug on each. This design, which does not require any screws, allows quick opening and closing of the compartment. See 0 and 0.

STRUCTURE

As commented above, both hulls are connected through an aluminum structure designed for the attachment of different sensors and other components.

The final dimensions of the ORCA300-AUV are 3.05 meters length by 0.70 meters diameter in the widest part, with an approximate weight of 70 kg. The real constructed vehicle is shown in 0.

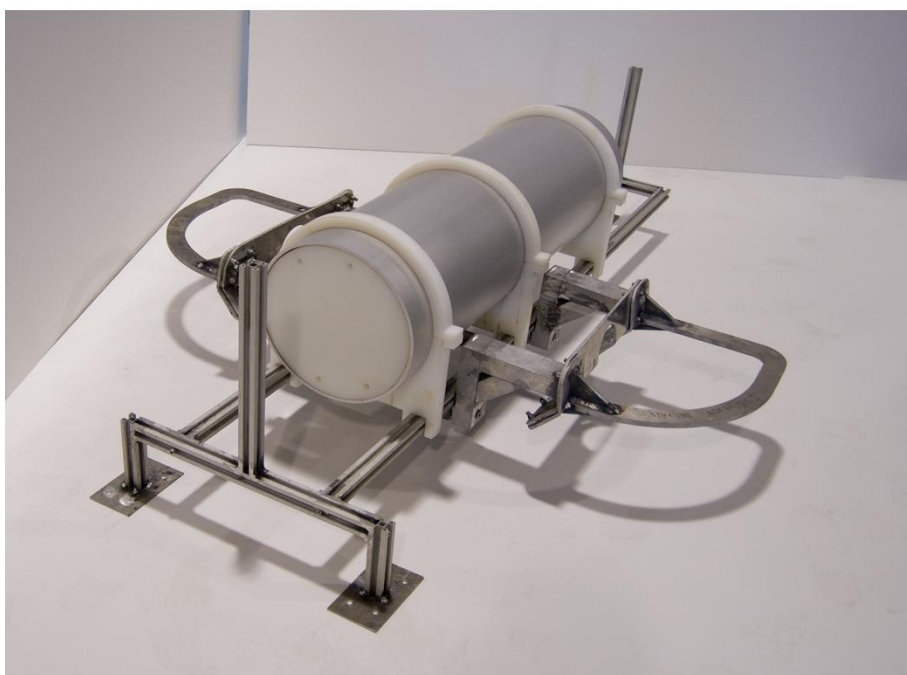
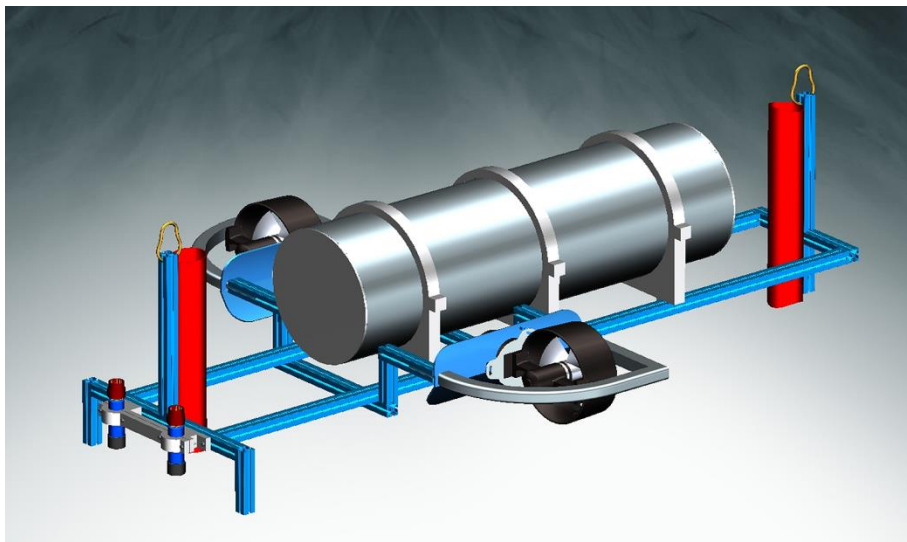


Fig. 6 Structure



Fig. 7 ORCA AUV final design

CFD ANALYSIS

The computational fluid dynamics (CFD) simulations are based on finite element analyses of the water volume moving around the ORCA300-AUV as seen in 0.

Hydrodynamic performance depends directly on the hull shape. From experience, the most hydrodynamically efficient shape is that of the water drop, which consists of an ellipsoidal front part and paraboloid rear part [0].

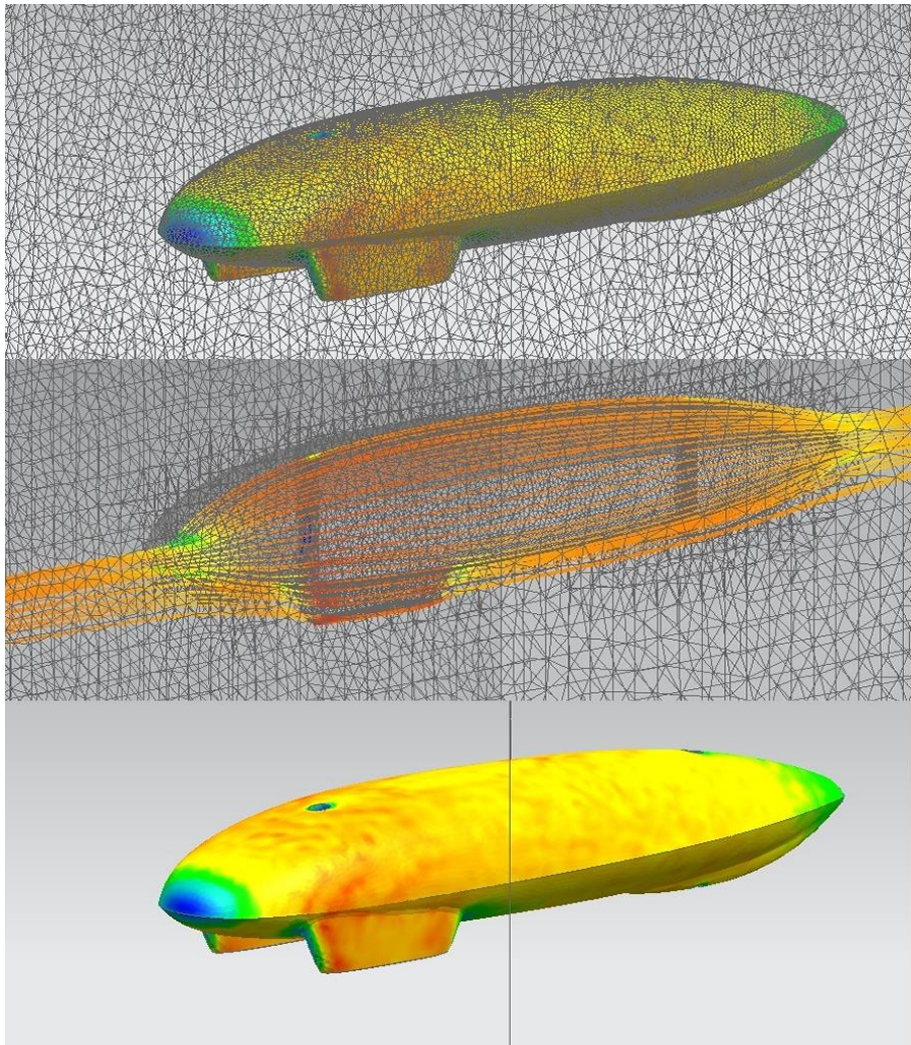


Fig. 8 CFD simulations

We have considered the effect of the apparent current around the vehicle, measuring the angles corresponding to the spherical coordinates.

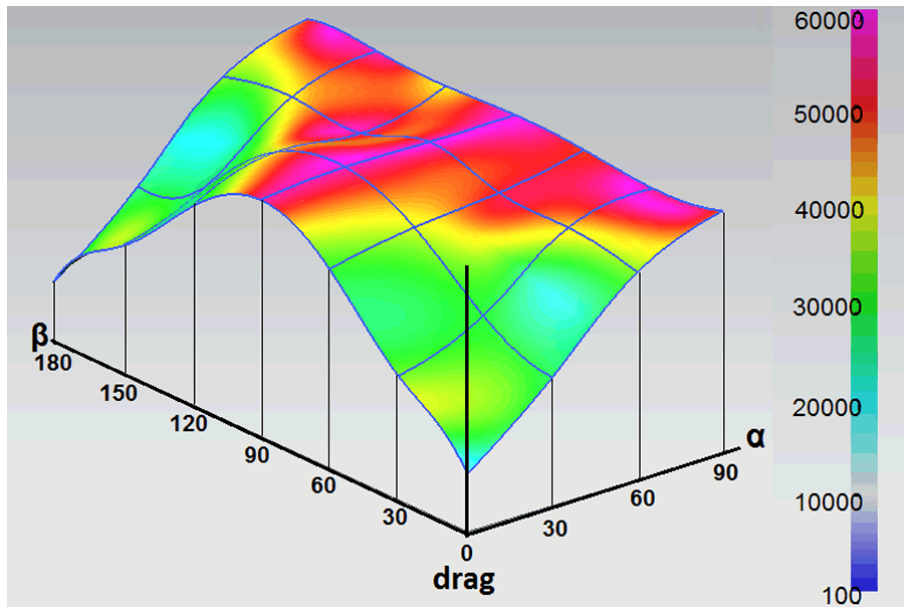


Fig. 9 Drag forces

0 corresponds to the magnitude of the drag force in function of the two angles of the currents with respect to the position of the AUV. Similar two-dimensional functions are obtained associated to the application points where each drag force acts on the external hull, as well as the direction of that force.

With the set of two-dimensional functions, drag forces can be included in the dynamic model of the AUV in order to perform a precise simulation of movements of vehicle in the water current.

HYDROSTATIC PRESSURE

The hydrostatic pressure is the force by unit area applied on a body submerged in a liquid, hydrostatic pressure inside a liquid depends on the specific weight of the liquid and depth.

For this case, this pressure is applied by the seawater on the hull of ORCA300. At any point on the submerged hull the pressure is applied, this pressure try to compress the hull. See 0.

By depend of the depth, if a body submerged in the sea, pressure increases proportionally with depth.

Know that the hydrostatic pressure depends on the density of sea water, the gravity and the depth of place where the pressure measured, then:

$$P_h = \rho g h \quad (1)$$

where P_h is the hydrostatic pressure

ρ is the density of sea wáter

h is the depth

we estimate that 100 meters, is the maximum depth to ORCA300 made the missions in an initial phase. For 100 meters the pressure will be:

$$P_h = 1028.19 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 100 m$$

$$P_h = 1,001 MPa$$

The hydrostatic hull is made of aluminum 6063, this alloy is very used in industry in all cases it takes a high chemical resistance to atmospheric agents, including in marine environments.

The aluminum 6063 has good mechanical resistance, in addition excellent capacity of anodized, covering important for reducing corrosion.

some mechanical properties of aluminum 6063 are:

- Poisson coefficient 0,33
- Ultimate tensile strength of at least 117 Mpa
- Yield strength of at least 62 MPa

To make the hydrostatic hull will use an aluminum tube-6063 of 312 mm diameter and 6 mm thick.

To calculate the stress applied to the hydrostatic hull, caused by the hydrostatic pressure, we have the following equation:

$$\sigma = \frac{p_h r}{t} \quad (2)$$

where σ stress applied

p_h hydrostatic pressure

r radius of the tube

t thickness of the tube

The stress applied calculate is:

$$\sigma = \frac{1,001 \text{ MPa} * 0,312 \text{ m}}{6 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$\sigma = 52,05 \text{ Mpa}$$

$\sigma < \text{yield strength}$

The result was also verified with the CAE simulation

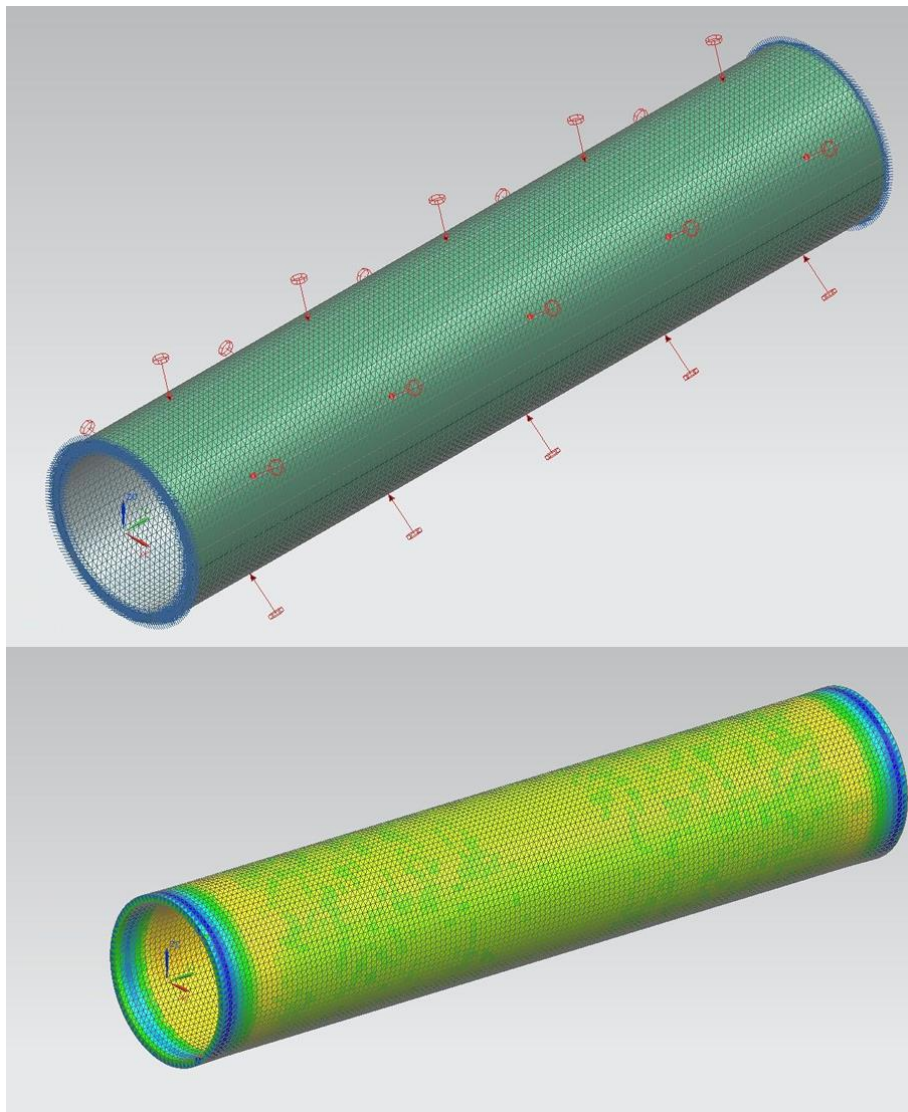


Fig. 10 Stress applied simulation

Finally the stress applied by the hydrostatic pressure is less than the maximum resisted by the aluminum 6063, in conclusion the material does not fail.

SYSTEM SENSORS

TRITECH MICRON DST SONAR

The Tritech Micron DST (Digital Sonar Technology) Scanning Sonar (see 0) is a compact active sonar, able to work up to 750 meters deep, with 35° vertical beam resolution and 3° horizontal beam resolution. It includes CHIRP technology, which improves the range resolution compared with conventional scanning sonars.



Fig. 11 Mechanical Scanning Imaging Sonar

CHIRP (Compressed High Intensity Radar Pulse) techniques have been used for a number of years above the water in many commercial and military RADAR systems. The techniques used to create an electromagnetic CHIRP pulse have now been modified and adapted to commercial acoustic imaging sonar systems.

The 'range resolution' effectively determines the ability of the sonar to identify separate targets. Using 0, if two targets are less than 37.5mm apart then they cannot be distinguished from each other by a conventional sonar. The net effect is that the system will display a single large 'combined' target, rather than multiple smaller targets, and any fine sonar detail is lost.

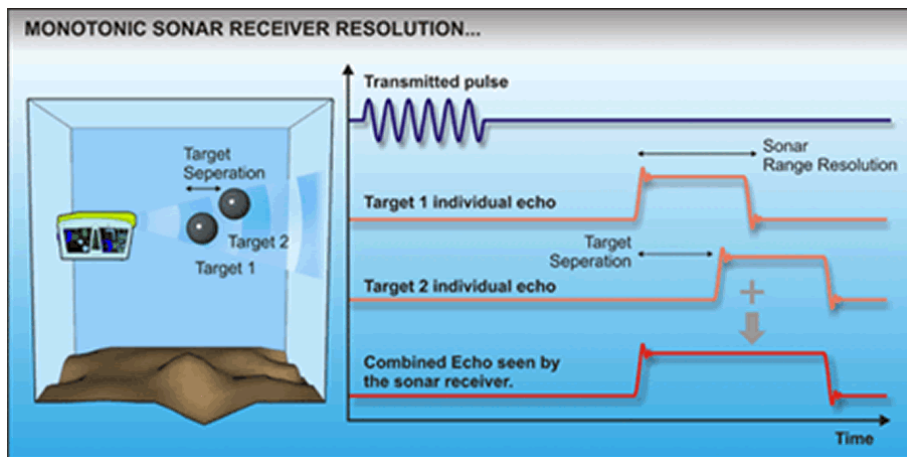


Fig. 12 Monotonic sonar receiver resolution

With CHIRP, instead of using a pulse of a single carrier frequency as in conventional sonars, the frequency within the pulse is changed (swept) throughout the duration of transmission. Therefore, when two acoustic echoes overlap, the pulses do not merge into a single acoustic return (as their frequency is different from each other at the overlapping points), and the sonar is able to resolve and display the two targets independently (see 0).

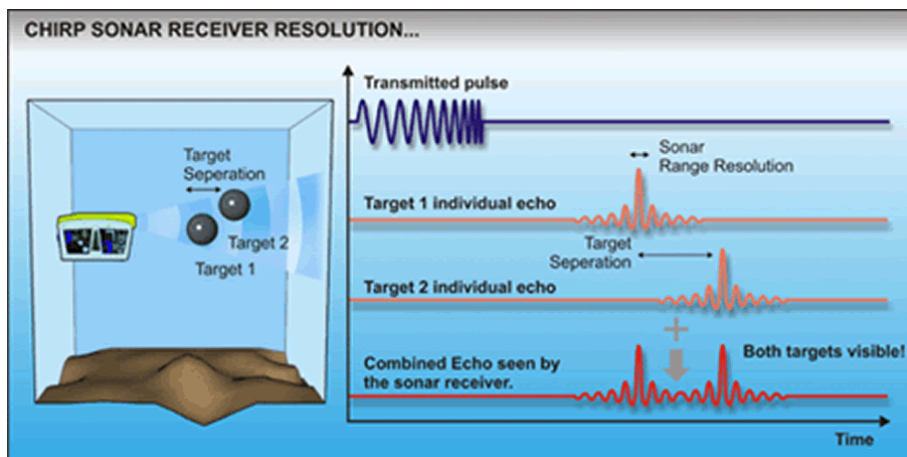


Fig. 13 CHIRP sonar receiver resolution

Therefore, it is possible to have longer transmissions (and see targets further away) without a loss in resolution. Additionally, CHIRP signal processing techniques offer improvements in background noise rejection (as the sonar is only looking for a swept frequency echo, removing random noise or out-of-band noise).

The Micron DST Sonar can be controlled through RS232 or RS485 protocols and has a standard auxiliary port to allow it to interface with other Triton sensors.

Nominal Voltage	12VDC
Nominal Power	50W
Operating Frequency	650kHz to 750kHz
Beamwidth, vertical	35°
Beamwidth, horizontal	3°
Range settings	From 2m to 75m
Operating temperature	-10°C to +35°C
Maximum operational depth	750m

Table 1 Micron DST Sonar characteristics

VISION SYSTEM

The vision system is composed of a pair of underwater CCD cameras and frame grabbers (see 0), mounted for stereo image processing. Shark Eye 550 analog color cameras are connected, through a RCA cable, to the respective FALCON analog frame grabbers that are, at the same time, connected in PCI-slots of the main controller.



Fig. 14 Vision system

Nominal Voltage	12VDC
Nominal Power	10W
Imaging sensor	1/3" Sony CCD II
Sensibility	0.05 LUX
Maximum operational depth	50m

Table 2 SharkEye 550 camera characteristics

INERTIAL MOMENT UNIT (IMU)

The MT9 by XSens (see 0) is a miniature inertial measurement unit providing serial digital output of 3D acceleration, 3D rate of turn (rate gyro) and 3D earth-magnetic field data. It is controlled through RS232 serial interface.



Fig. 15 Xsens MT9 IMU

GPS

An example of submersible GPS antenna is the AD 450 from Nautilus Marine Service GmbH (see 0).

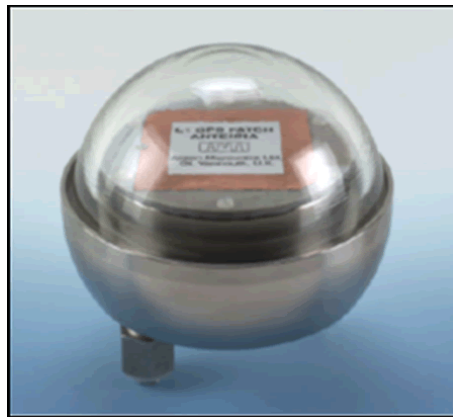


Fig. 16 GPS antenna

Gain is factory preset in the range 30 to 48dB to suit the GPS receiver with which it is to be used. Supply voltage range is 4.85 to 20 volts. The in-band noise figure of the amplifier/filter combination is <3dB.

SYSTEM ACTUATORS

PROPULSION THRUSTERS

Two Seaeye Thruster SI-MCT01 brushless DC motors (see 0) are in charge of providing the vehicle the propulsion movement capacity.

To maintain constant speed under varying loads, Thrusters are provided with a closed loop control system. Hence, the power applied to the motor is determined by the difference between the user demand and the actual shaft speed.



Fig. 17 Seaeye Thruster SI-MCT01

They are connected through RS485 to the main controller.

Nominal Voltage	48VDC
Nominal Power	300W
Forward Thrust @ 300W	13 kgf
Reverse Thrust @ 300W	12.8 kgf
Propeller Speed @ 300W	960 rpm
Weight in Air	4.3 kg
Weight in Seawater	2.5 kg
Maximum operational depth	300 m

Table 3 Propulsion thrusters characteristics

IMMERSION THRUSTERS

Two D75 DC motors from Albatros Marine Technologies (see 0) are used for immersion and emersion. They are controlled through an electronic control board via I2C, which is, at the same time, connected to the main controller through a USB/I2C adapter.



Fig. 18 D75 immersion thruster

Nominal Voltage	24VDC
Nominal Power	80W
Forward Thrust @ 80W	1.1 kgf
Reverse Thrust @ 80W	0.63 kgf
Propeller Speed @ 80W	1800 r.p.m
Weight in Air	380 g
Weight in Seawater	260 g
Maximum operational depth	100 m

Table 4 Immersion thrusters characteristics

HARDWARE ARCHITECTURE

A fanless embedded industrial PC, IPC 916 from Axiomtek (see 0), has been chosen as the AUV main controller, mainly because of its robustness and expansion possibilities. In case of needing more processing power, new processing boards can be added to create an Ethernet-based distributed architecture.

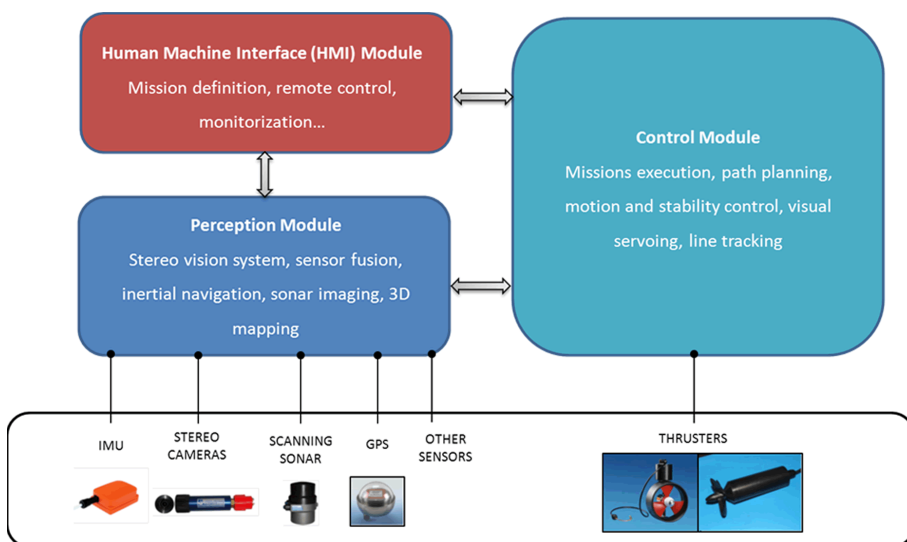


Fig. 19 ORCA-AUV software architecture

The controller is based on a Core2Duo @ 2.53 GHz, with 4GB SDRAM, 3xRS232, 1xRS485, 2 USB 2.0, 2xLAN Gigabit Ethernet and 6 PCI expansion slots.



Fig. 20 Axiomtek IPC 916 main controller

The connections diagram is shown in 0:

- Compact sonar and IMU are connected through RS232 serial port.
- Propulsion motors are connected to RS485 port.
- Immersion motors are connected to a USB port with a USB/I2C adapter.
- Cameras are connected to two frame grabber in PCI-slots.

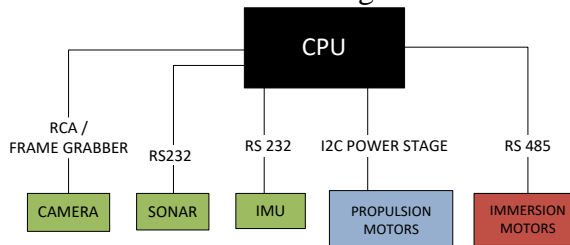


Fig. 21 Hardware connections

Voltage regulators are placed for meeting voltage level requirements of the different components. The system is prepared for either batteries or AC powering (see 0).

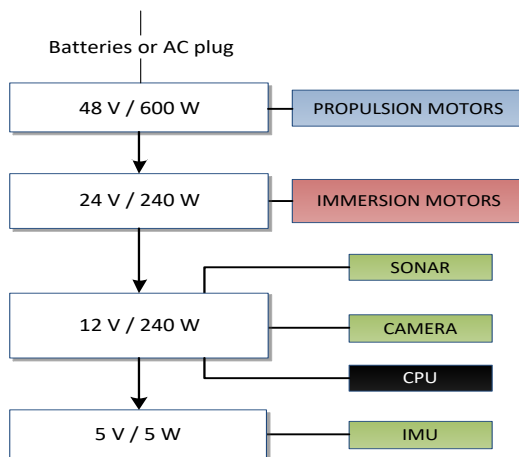


Fig. 22 System powering

SOFTWARE ARCHITECTURE

The software architecture is implemented under ROS (Robotics Operative System) framework [0]. ROS is open source software that provides libraries and tools to help the robotic community to develop new robot applications. The program is structured in nodes that communicate with each other through standard publication/subscription methodologies.

The ORCA300-AUV architecture contains three main modules, each one containing as many ROS nodes as needed for the particular application purpose. The sensor nodes will be organized as POSIX threads to guarantee real-time control. An overview of the system is given in 0.

- Perception Module. Environment interpretation through the set of sensors installed in the vehicle, allowing research on the fields of stereo vision system, scanning imaging sonar, inertial navigation, 3D mapping, sensor fusion, etc.
- Human Machine Interface (HMI) Module. Monitorization of the system status, including sensors, warnings, failures, etc. as well as remote control and mission definitions for the *Control Module*, all that using a multitouch screen.

- **Control Module.** Executes the corresponding control loop and sends the control commands to the actuators. Incoming data is provided either from the *Perception Module* or the *HMI Module*. This module will contain the algorithms to execute applications such as path planning, motion and stability control, visual servoing, line tracking, etc.

The hardware components are interfaced through the corresponding drivers, using serial communication or frame grabbers (stereo vision system).

INTERACTIVE SIMULATOR

The main goal of the DIVISAMOS Interactive Simulator was to show a realistic appearance of the submarine and its performance in relation to a natural environment (the ocean), offering a good understanding of its components, in an interactive way. In addition the goal was to use it as a platform for simulating the control and operation of the submarine in real time.

Currently, the result is a multiplatform distributable program (for Mac and Windows) that helps to demonstrate the concept of the submarine. This simulator allows for the observation of the external and internal structures and components in motion and in a realistic marine environment.

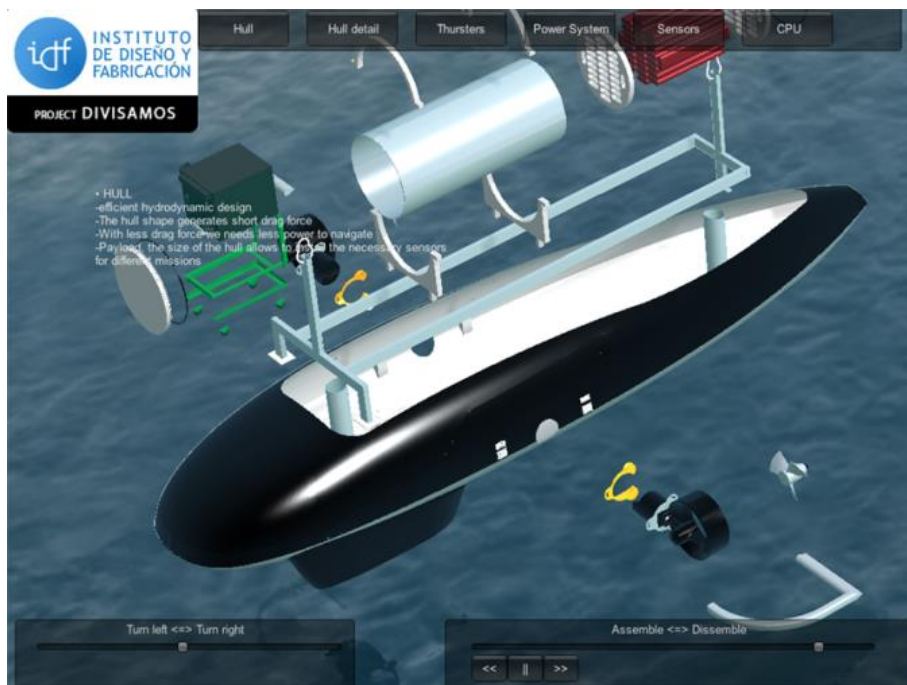


Fig. 23 Detailed view of ORCA300-AUV

RUNNING THE SIMULATOR

When running the program for first time, the starting point of the submarine is underwater, and the point of view is located in a proper place to show the full hull during the lift and disassembling process, which occurs in the air

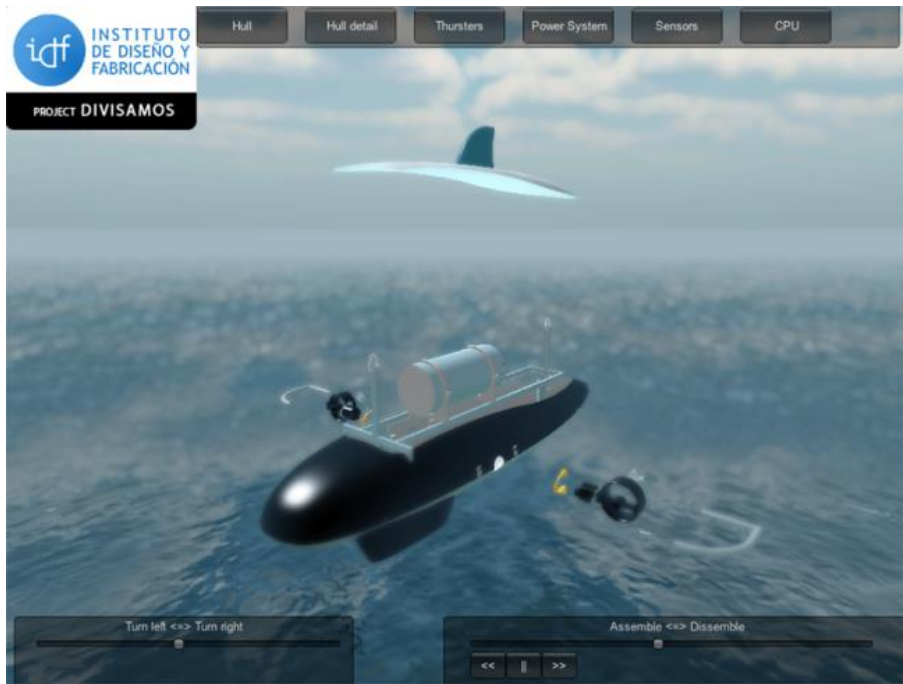


Fig. 24 Simulator first point of view

On the bottom right area of the screen a slider and two play buttons allow the user to control the speed of the assembling/disassembling animation. In a similar way, the slider on the left part of the screen sets the speed and direction of a continuous rotation on the Y-axes. This animation is essential in 3D visualization showing the external and internal relation among the components of the system. In order to improve this 3D visualization, we have introduced a visual effect that simulates the depth of field of the camera, helping to distinguish the distances in the Z-axes.

The interface presents a line of buttons on the top to follow the individual parts of the machine during the assembly and disassembly process. Each button is linked to a different camera as shown in 0.

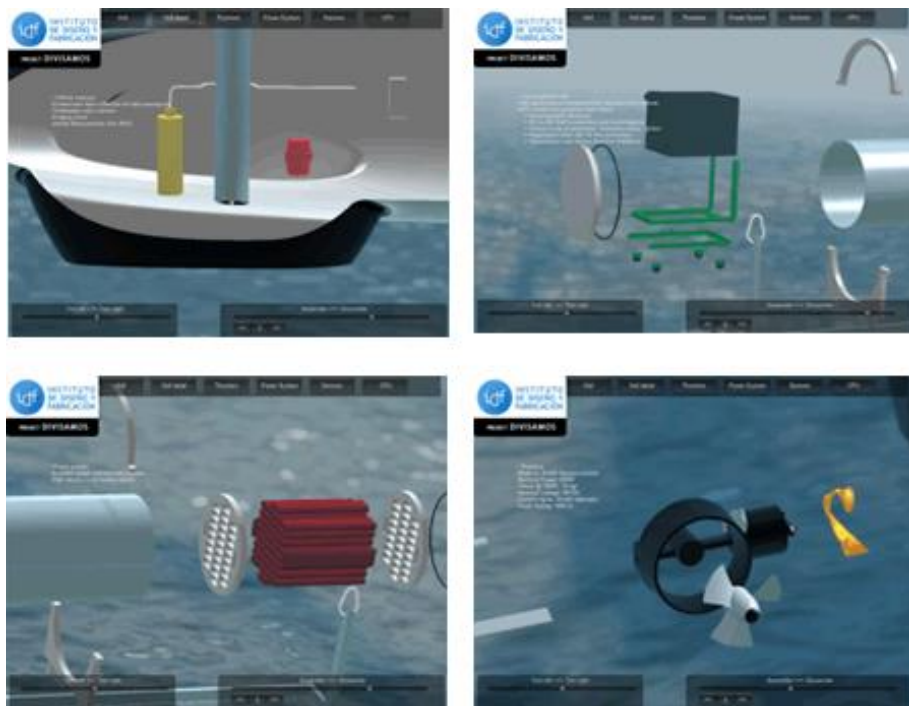


Fig. 25 Detailed view of parts of ORCA300-AUV

There is also one button for watching a detailed view of the complete group from a closer camera (0, 0 and 0).

THE SIMULATOR ENGINE

A large number of robot and 3D interactive simulators are available on the market, but none gather the advantages of Unity3d as a flexible and easy platform for programming tridimensional interactive spaces [0].

The Danish enterprise Unity Technologies develops the custom-rendering engine. It incorporates also the nVidia PhysX physics engine for realistic physics calculations, and Mono, the open source implementation of Microsoft's .NET libraries, for adding custom C# scripts. Some of the advantages of this engine are: complete documentation with examples for its entire API; an active on-line developer community; the

simplicity and integration of the editor and tools in one simple interface, where content and scripts are added by drag-n-drop operations; both C#, and Javascript scripts can run simultaneously giving much flexibility to program interactive behaviors, create user interfaces and control animations.

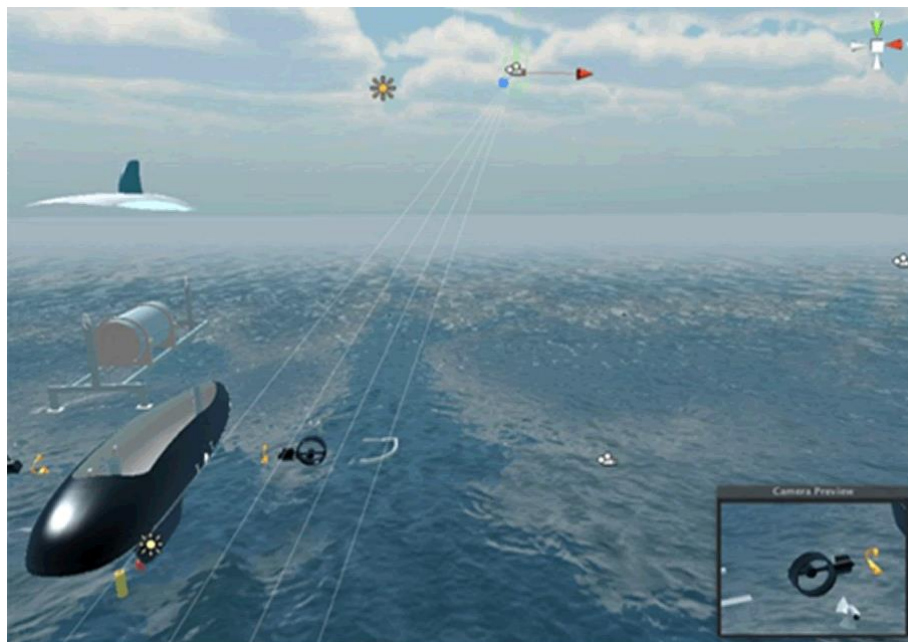


Fig. 26 Editor view in Unity3d

0 shows a screenshot of the Unity Animation Editor being used to program camera animations that can be triggered by user actions, like a click on a button. In summary, Unity3d engine is an optimal solution for a high realistic, developer friendly and cost effective simulation environment.

SHADERS

Shaders define the rendering properties of the 3D objects, such as the definition of realistic materials when required.

In terms of programming custom Shaders, an important issue of Unity is the simplified shader language, which is compiled into DirectX 9 or OpenGL 2.0 shaders, depending on the target platform.

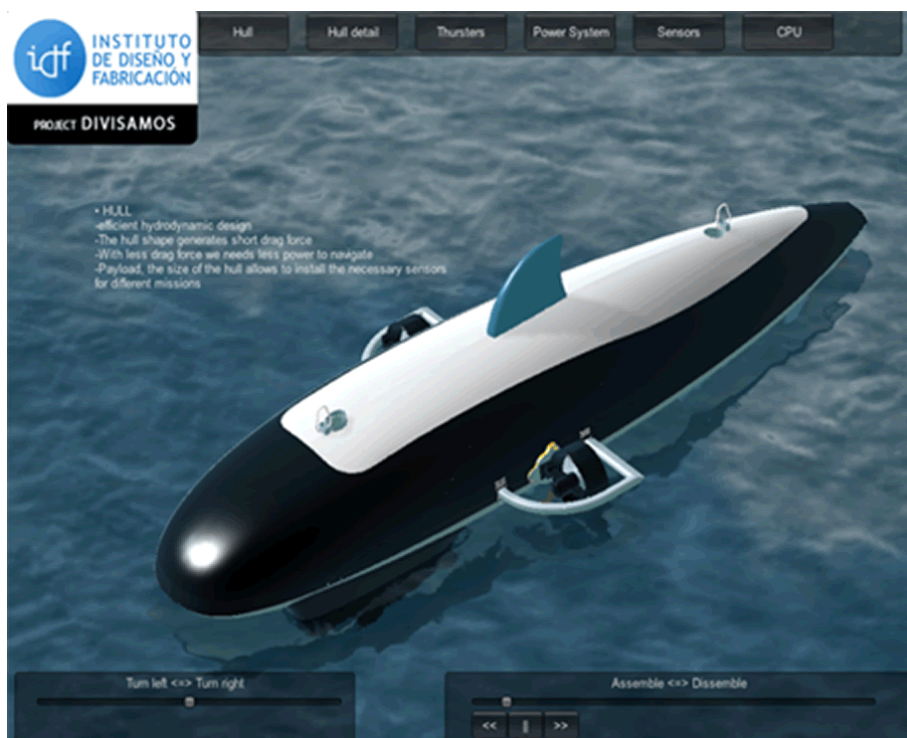


Fig. 27 Shaders realistic effects

Our custom submarine main shader is composed by diffuse, reflection, and environment maps, in combination with two variables that help to create a complex glossy material, like a car painting. Most of the objects have this shader attached with some variations on the diffuse color and custom reflection properties. The water surface is a great example of the capabilities of complex shaders to produce realistic effects when they work with modern graphic-cards. See 0.

MODELLING AND ANIMATION

The submarine is modeled in Autodesk 3D StudioMax and consists of a hierarchy of objects that are the components of the vehicle: hull, sensors, thrusters, etc. Unity imports the native 3d files in a FBX format, and maintains the object hierarchy, although it can be rearranged on the editor to add or subtract other 3d objects to the final result.

There are two main animations: one for the rotation of the full group, and another for the assembling/dissassembling the submarine. The animation of the objects can be imported from the original FBX file, but we decided to do it from the animation editor of the program to control better the result within the final environment.

As a result, the user can operate with the sliders and buttons to change the speed and direction of both animations, creating a unique interactive experience to capture the essence of the submarine design and structure.

UNDERWATER CONTROL APPLICATIONS

Underwater vehicles modeling is based on the mathematical model for non-holonomics vehicles. The dynamics of the system are highly non-linear due to rigid body coupling and hydrodynamics forces on the vehicles [0].

Let $q = [\rho \quad \eta]^T$ be the vector of six generalized coordinates required to specify the kinematics of the vehicle. The six coordinates are the Cartesian coordinate vector $\rho = [x \quad y \quad z]^T$ of the vehicle in the local frame and the orientation coordinate vector $\eta = [\phi \quad \theta \quad \gamma]^T$.

For the particular case of ORCA300, the vehicle has 4 DOF: linear movement along x and z axis, angular movement along z and y axis. Let $v = [v_x \quad 0 \quad v_z]^T$ be the linear velocity along the x and z axis, and let $\omega = [0 \quad \omega_y \quad \omega_z]^T$ be the angular velocity components along the axis y and z, respectively in the body frame. The velocity vector along

the three coordinate axes and the time derivative of the Euler angles are obtained from the following relations:

$$\begin{cases} \dot{\rho} = Rv \\ \dot{\eta} = RS(\omega) \end{cases} \quad (3)$$

where $S(\omega)$ is the skew-symmetric matrix and $R = R_{w,\phi}R_{v,\theta}R_{u,\gamma}$ the transformation from the local coordinate frame to the global coordinate frame, where u , v and w are the axis in the local frame. This can be written as,

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta c\gamma & s\theta c\phi c\gamma + s\phi s\gamma & 0 & 0 \\ c\theta s\gamma & s\theta c\phi s\gamma & 0 & 0 \\ -s\theta & c\phi c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & 0 & s\phi \sec\theta & c\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

$$\dot{q} = G(q)v \quad (4)$$

where c , s and t are the cosine, sine and tangent of the angles, respectively. The above equations are the kinematic model of the system. The system is non-linear and under-actuated, which means that the number of inputs to the system is less than its states.

Respecting the dynamic model, the vehicle motion may be described in terms of the twelve non-linear system equations [0] as,

$$\begin{aligned} M(t)\dot{v} &= f(v(t), q(t), c(t)) + g(v(t), q(t))u_c(t) \\ \dot{q} &= h(v(t), q(t), v_c) \end{aligned} \quad (5)$$

where $M(t)$ is a coupled mass matrix that includes both mechanical and hydrodynamic added mass; the functions f and g , which are mapping of the vehicle motions into forces, including Coriolis, gravitational, and centrifugal forces; the hydrostatic and dynamic forces and moments acting on the vehicle in the body fixed coordinate frame, with coefficient c ; the motion-dependent influence of control surfaces, thrusters, and

any ballasting; and the function h , which includes the kinematical relationships found in performing the coordinate transformations between body fixed and global reference frames and the constant ocean current, v_c . The vector $u_c(t)$ is the control input vector from control surfaces, propeller speeds, thrusters' forces, and buoyancy adjustment in general.

The more useful control techniques for underwater vehicles are,

- Control using approximate linearization [0].
- Control using exact feedback linearization via static feedback, [0].
- Control using exact feedback linearization via dynamic feedback, ([0],[0]).
- Control with smooth time-varying feedback [0].
- State feedback control using back-stepping [0].
- Robust control by the Lyapunov redesigns method [0].

SONAR FEATURE EXTRACTION AND NAVIGATION

There has been a great deal of research undertaken in developing techniques for automatic feature extraction and classification of sonar data and its use in feature based navigation schemes for AUVs, for example [0], [0], [0] and [0].

Point features are identified from the sonar scans returned by the imaging sonar and are used to build up a feature map of the environment, which could be either a pool or open water.

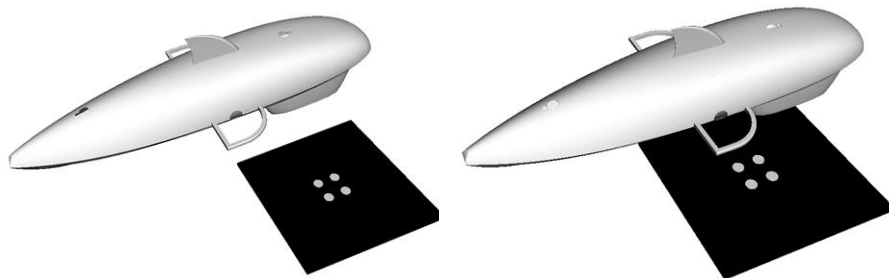
VISUAL BASED CONTROL

In the underwater robotics field few attempts have been made to use vision sensors for control ([0], [0], [0], [0]). However, vision provides some interesting features compared to classical positioning sensors. For example, magnetic compasses suffer from a slow update rate and cannot be used in the vicinity of man-made metallic structures. With the exception of depth sensors, which are both accurate and fast, on-board

translational motion sensors are integrating sensors (i.e. accelerometers, Doppler velocity logs) hence subject to drift, and therefore unsuitable for station keeping. However, a camera is not subject to magnetic influences. It can also be used as a local absolute positioning sensor.

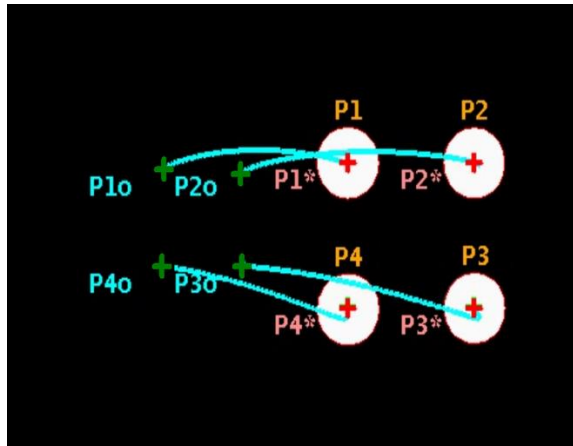
Despite its short range (typically 3-10 meters) and the need for heavy computing power, visual control (also called visual servoing) allows very diverse tasks such as for example station keeping ([0] and [0]) or pipe-following [0] to be carried out.

In fact, one of the future task evolving ORCA300 is the application of vehicle keeping meanwhile other task an attached arm robot is doing (pipe leakage reparation) or pan-tilt-yow camera inspection. These tasks can be achieved using visual servoing algorithms ([0] and [0]). Although these techniques are extensively used for arm robots, many contributions for AUV can be found in the literature ([0] and [0]). 0 shows an example of visual servoing for the case of ORCA300. The goal is to achieve the desired pose which is a mark in the terrain formed by 4 points. 2D visual servoing [0] classic technique is used in order to do this task.



a) Initial pose

b) Final pose



c) Camera image plane.

Fig. 28 2D Visual Servoing for vehicle keeping task: initial pose, green crosses, desired pose, red crosses, trajectories in image plane in cyan.

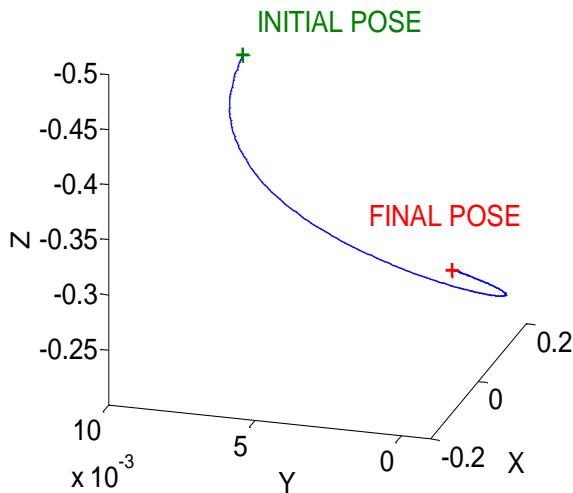


Fig. 29 Camera pose with respect to desired target.

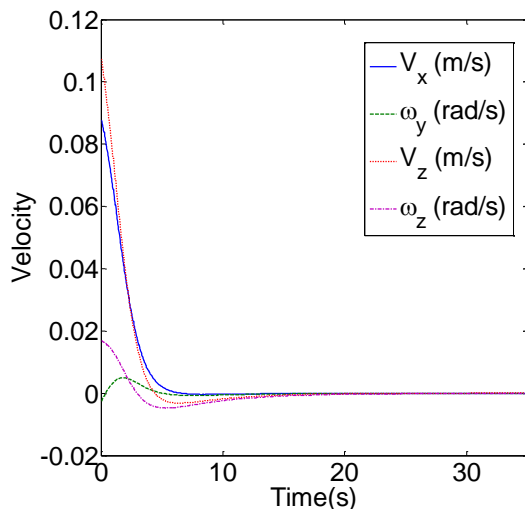


Fig. 30 Control actions.

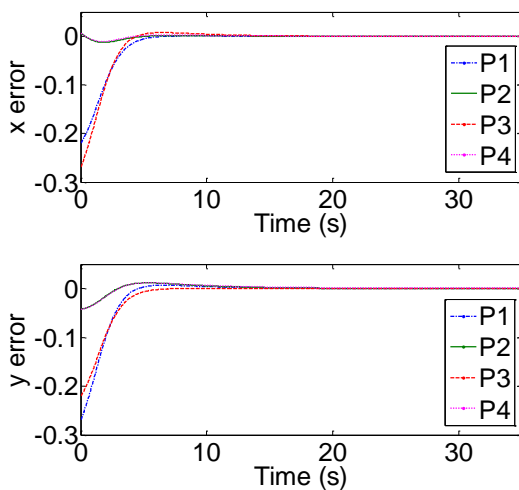


Fig. 31 Features error in normalized coordinates.

0 shows the camera trajectory with respect to the desired pose. In this case the desired pose is giving by four points, but is extensible to any other detected feature or mark. 0 and 0 show the control action and the

features error, respectively. Remark that due to the vehicle has only 4 DOF not all the poses can be achieved and the time of convergence depends on this desired pose (i.e., y displacement depends on the rest of DOF).

VISUAL LINE TRACKING

Other application involving visual control is visual target tracking, which can be broadly used for AUV navigation:

- Studying the behavioral patterns of unknown underwater life forms.
- Routine observations of man-made systems.
- Underwater pipe inspections.
- Underwater cables tracking.
- Underwater docking stations.
- Optical flow techniques.

During last three decades path tracking and line following have been studied in the field of mobile robotics. Most of these works focus on wheeled vehicles following roads ([0], [0]) or painted lines on the floor ([0], [0]). However, the solutions used in those cases can be easily applied to AUVs, as can be seen in some works about pipeline and cable following in underwater environments, such as ([0],[0],[0],[0],[0]).

In order to perform tasks of pipe inspection and cable tracking we will use a vision system to detect lines and determine a target configuration to be reached. Our submarine will try to follow this goal with a reference speed, where a PID controller will keep the velocity as close to the reference value as possible. On the other hand a kinematic controller will steer the vehicle in order to follow the pipeline trying to keep the line centred to the image.

As a kinematic controller we can use for instance the Pure-Pursuit technique [0], which determines a circular arc that joins the vehicle pose with a target point in the path. The target configuration is obtained with

a determined Look-Ahead distance from the robot position, so that, if the process is repeated each iteration the control law will try to reduce the lateral error Δx of the target with respect to the robot. So, if we suppose that the AUV is moving parallel to the pipeline's plane (with h the distance between both planes) we can apply the same control law as with a wheeled mobile robot. Therefore, the problem can be simplified to the scheme in 0, where both the centre of coordinates of the AUV and the image plane are projected to the cable's plane. Then, with a look-ahead distance (LA) a new target point is selected as intersection between the detected line and the circular arc with radius LA , whose centre is located in the instantaneous centre of rotation (ICR).

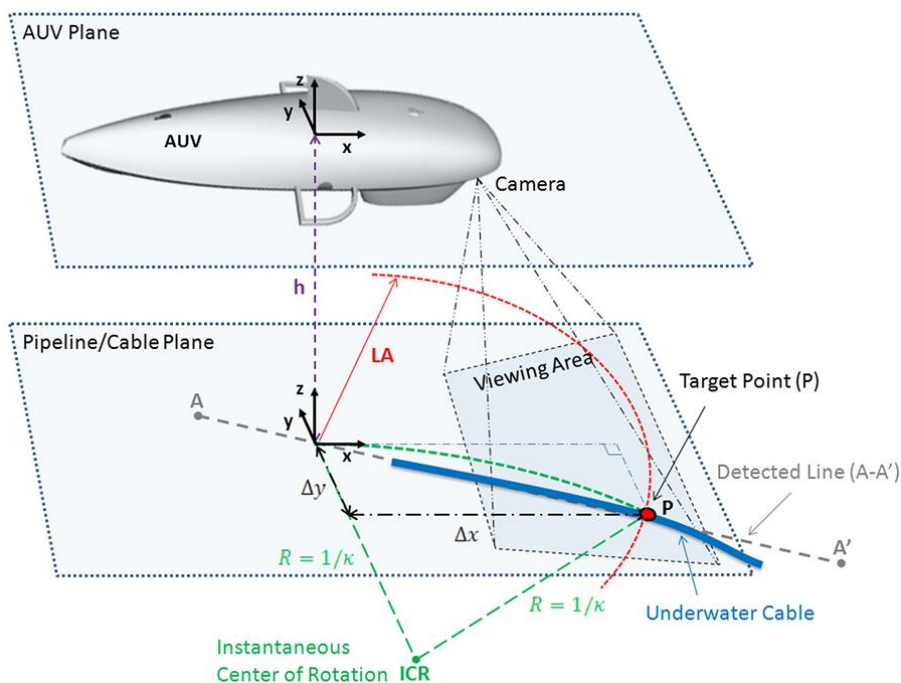


Fig. 32 Underwater pipeline following.

Once the goal configuration is known the control actions can be obtained as follows:

$$\begin{aligned}v_x &= v_{ref} \\v_z &= 0 \\\omega_y &= 0 \\\omega_z &= v_x \cdot \kappa\end{aligned}$$

where $\kappa = \frac{2 \cdot \Delta x}{L \Delta^2}$ is the curvature necessary to reach the target point.

Now, the aim is determine an algorithm to process images in order to detect pipelines or cables in underwater environments and get a new goal configuration each control step. It's interesting to remark that our approach is based on standard procedures and uses the well-known OpenCV library [0], therefore no particular contribution about the algorithm is claimed in this section.

The proposed algorithm is based in the following steps:

- In some cases, a first step is required in order to smooth the image based on median, Gaussian or blurring filters so that filter out potential problems introduced by shadows, stains or vegetation, especially in underwater environments (see 0 (b)).
- To enhance the object of interest a background subtraction can be done, like in 0 (c).
- A threshold operation is also applied to provide a binarized image as shown in 0 (d).
- Open, close, erode and dilation operations are applied after image binarization in order to remove small blobs or regions as well as to fill holes of existing regions. The selected region is the one with the highest area as shown in 0 (e).
- Detection of multiple lines on the selected region based on standard Canny edge detector, as shown in 0 (f) and then Hough transform, depicted in 0 (g).
- Central line computation by merging lines with similar characteristics, grouping parallel lines with a coarser distance threshold and computing intersection points of sorted lines from bottom to top of

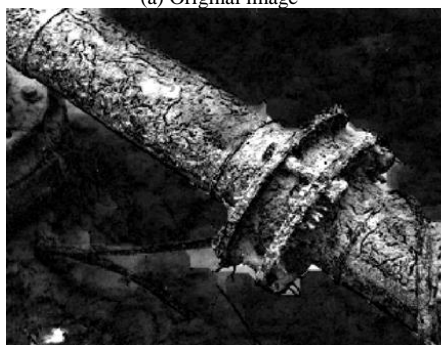
- the image which constitute a set of sorted waypoints with increasing distance to the mobile base as shown in 0 (g).
- Ground plane projection of waypoints and target selection based on a look-ahead distance LA as depicted in 0 (h).



(a) Original image



(b) Smoothing



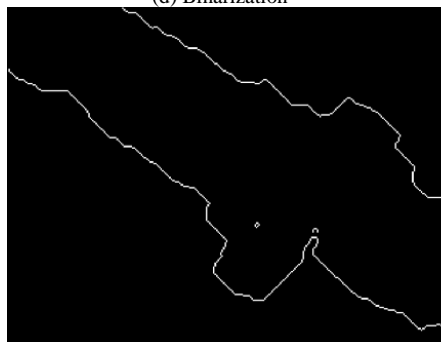
(c) Background subtraction



(d) Binarization



(e) Segmentation



(f) Edge detection

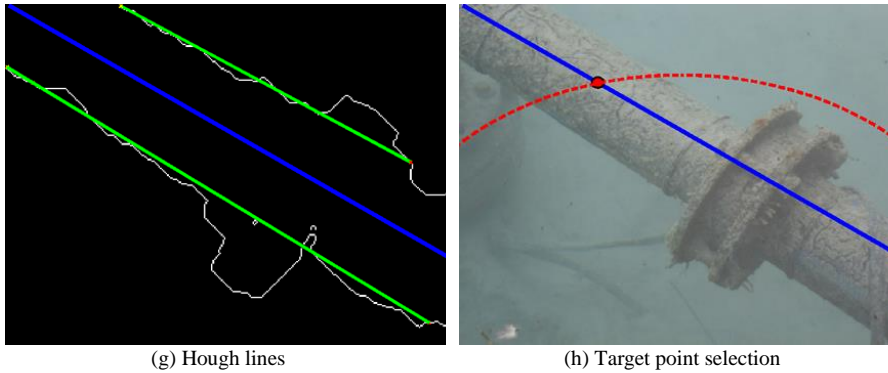


Fig. 33 Intermediate image processing steps.

SENSORIAL FUSION FOR AUV NAVIGATION

Fusing the information from visual and sonar systems can lead to a robust feature extraction and target tracking performance.

In 0, Lane et al. [35], review the general data fusion methodologies. Data fusion can be broadly classified as: estimation methods, classification methods, inference methods and artificial intelligence methods.

Estimation methods	Non-recursive: Weighted Average Least Squares Recursive: Kalman Filter Extended Kalman Filter
Classification methods	Parametric Templates Cluster Analysis Learning Vector Quantization (LVQ) K-means Clustering Kohonen Feature Map ART, ARTMAP, Fuzzy-ART Network
Inference methods	Bayesian Inference Dempster-Shafer Method Generalized Evidence Processing
Artificial intelligence methods	Expert System Adaptive Neural Network Fuzzy Logic

Table 5 Data fusion methodologies

CONCLUSIONS

The paper is organized in such a way as to give: an overview of a particular 3 year research project in maritime technology (DIVISAMOS); the context in which this project was included, in terms of European Regulations and initiatives; the design and construction of a hydrodynamically and hydrostatically efficient mechanical submarine; the selections of a set of sensors and actuators (devices and thrusters) in addition to computer and communications components; the software and hardware architecture for the submarine; the interactive simulator for understanding the submarine performance and structure, which will be

used also for simulation and teleoperation and finally the set of direct research already defined for the submarine.

Specifically, the main contribution of DIVISAMOS is to have an underwater auto-guided and partially teleoperated submarine that can be fitted with a variety of sensors and instrumentation to perform a variety of missions, mainly for analysis of ocean waters, but also for monitoring in both civil and military facilities.

In particular, some applications of social interest are: the coast supervision and surveillance using the submarine in order to analyze the degradation of the habitat (biodiversity) of the seaboard caused by toxic substances; the analysis of the seaboard erosion caused by construction at harbor areas as well as the searching and localization of flotsams.

Even though some enterprises try to sell commercial submarines, most of them are still unaffordable for general customers who want to use them in civil applications.

Our contribution to this field can be divided into two aspects: 1) Introduce a methodology for constructing low-cost submarines based on affordable components and new material; 2) Apply all our research experience in auto-guided and controlling terrain vehicles to maritime technology.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by FPI Program (Spanish Ministry), DIVISAMOS Project (Spanish Ministry), PROMETEO Program (Conselleria d'Educació, Generalitat Valenciana) and MAGV Project (PAID-05-10 Program from VIDI UPV)

REFERENCES

- [1] John J. Leonard, Andrew A. Bennett, Christopher M. Smith, Hans Jaco B.Feder. Autonomous Underwater Vehicle Navigation. *MIT Marine Robotics Laboratory Technical Memorandum 98-*, 1998.
- [2] X. Yun et. al., Testing and Evaluation of an Integrated GPS/INS System for Small AUV Navigation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999.
- [3] Bergem, O. A multibeam sonar based positioning system for an AUV. *Eight International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*. 1993.
- [4] F. Aguirre F. Grau J. Tornero. *Optimal Design Parameters of AUV Hull based on CFD Simulation*, 2011
www.ros.org
- [5] J. Craighead, J. Burke, and R. Murphy. Using the Unity Game Engine to Develop SARGE: A Case Study. *Simulation Workshop at the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2008
- [6] Sabiha Wadoo and Pushkin Kachroo, Autonomous Underwater Vehicles: Modeling, Control Design and Simulation. *CRC Press, 1 edition*, December 2010.
- [7] A. J. Healy and D. Lienard, Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 18(3), 1993, pp. 327-339.
- [8] Erfu Yang, Dongbing Gu, Tsutomu Mita, and Huosheng Hu, Non-linear tracking control of a car-like mobile robot via dynamic feedback linearization, *Proceedings of Control, University of Bath*, 100, ID-218.
- [9] H. Yuan and Z. Qu, Smooth time-varying pure feedback control for chained non-holonomic systems with exponential convergent rate. *IET Control Theory and Applications*, 2008.
- [10] M. Choux, H.R. Karimi, G. Hovland, M.R. Hansen, M. Ottestad

and M. Blanke, Robust Adaptive Backstepping Control Design for a Nonlinear Hydraulic-Mechanical System. *IEEE Conference on Decision and Control*. 2009.

[11] Giuseppe Conte and Andrea Serrani, Robust control of a remotely operated underwater vehicle. *Automatica*, volume 34, Issue 2. pp 193–198. 1998

[12] Brutzman D.P., Compton M.A. and Kanayama, Y. Autonomous sonar classification using expert systems. *IEEE Oceans, Newport, RI*. 1992.

[13] A., Bharath Kalyan and Balasuriya. Sonar based automatic target detection scheme for underwater environments using cfar techniques: A comparative study. *IEEE Underwater technology*. Taiwan, 2004.

[14] Bharath Kalyan et al., Sonar and Vision based Navigation Schemes for Autonomous Underwater Vehicles. *International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. 2004. pp. 437-432.

[15] R. L. Marks, H. H. Wang, Id. J. Lee, and S. M. Rock. Automatic visual station keeping of an underwater robot. *MTS/IEEE OCEANS*, 1994, vol. 2, pp. 131-142.

[16] Patrick Rives and Jean-Jacques Borrelly, Visual servoing techniques applied to an underwater vehicle. *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, NM, USA, April 1997, vol. 3, pp. 1851-1856.

[17] S. Negahdaripour, X. Xu, and L. Jin, Direct estimation of motion from sea floor images for automatic station-keeping of submersible platforms. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 24, pp. 370-382, July 1999.

[18] D. M. Lane, E. Trucco, Y. Petillot, I. Tena Ruiz, K. Lebart, J.-E. Lots, and C. Plakas, Embedded sonar and video processing for AUV applications. *Proceedings Offshore Technology Conference*, May 2000.

[19] Ezio Malis, François Chaumette, and Sylvie Boudet, 2 1/2 D visual servoing. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 2, pp. 238-250, April 1999.

- [20] Seth Hutchinson , Greg Hager , Peter Corke, A Tutorial on Visual Servo Control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996.
- [21] J.-E Lots, D. M. Lane, and E. Trucco, Application of 2 1/2 D visual servoing to underwater vehicle station keeping. *MTS/IEEE OCEANS*, 2000.
- [22] Lots, JF, Lane, DM, Trucco, E, Chaumette, F, A 2-D visual servoing for underwater vehicle station keeping. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001.
- [23] T.H. Hong, T. Chang, C. Rasmussen and M. Shneier, "Road Detection and Tracking for Autonomous Mobile Robots", Proceedings of SPIE Aerosense Conference, Vol. 4715, 2002.
- [24] M. Manz, F. von Hundelshausen, and H.-J. Wuensche, "A hybrid estimation approach for autonomous dirt road following using multiple clothoid segments," in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2010, pp. 2410–2415
- [25] Li. W;Xu C.;Xiad, Q; and Xu, X. "Visual Navigation of an autonomous robot using white line recognition", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2003.
- [26] V. Girbés, L. Armesto, and J. Tornero, "Pisala project: Intelligent sensorization for line tracking with artificial vision," in International Symposium on Robotics, 2010, pp. 558–563
- [27] Balasuriya, B.A.A.P.; Takai, M.; Lam, W.C.; Ura, T.; Kuroda, Y., "Vision based autonomous underwater vehicle navigation: underwater cable tracking," OCEANS '97. MTS/IEEE Conference Proceedings , vol.2, no., pp.1418-1424 vol.2, 6-9 Oct 1997
- [28] Balasuriya, A.; Ura, T.; , "Sensor fusion technique for cable following by autonomous underwater vehicles," IEEE International Conference on Control Applications, vol.2, no., pp.1779-1784 vol. 2, 1999
- [29] Arjuna Balasuriya and Tamaki Ura, "Underwater Cable Following by Twin-Burger 2". IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 920-925, May 21-26, 2001
- [30] Antich, J. and A. Ortiz (2003). Underwater cable tracking by visual

feedback. In: IbPRIA (A.C. Campilho, N. Perez, A. Sanfeliu and F.J. Perales, Eds.). Vol. 2652 of LNCS. Springer. pp. 53-61.

[31] Acosta, G.G.; Curti, H.J.; Calvo, O.A., "Autonomous underwater pipeline inspection in AUTOTRACKER PROJECT: the navigation module," *Oceans 2005 - Europe*, vol.1, no., pp. 389- 394 Vol. 1, 20-23 June 2005

[32] A. Ollero, *Robótica. Manipuladores y robots móviles*, 1st ed., S. Marcombo, Ed. Barcelona: Marcombo, S.A., 9 2001

[33] G. Bradski and A. Kachler, *Learning OpenCV*. O'Reilly Media Inc., 2008. [Online]. Available: <http://oreilly.com/catalog/9780596516130>

[34] J.P., Lane D.M. and Stoner. Automatic interpretation of sonar imagery using qualitative feature matching. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, volume 19(3). 1994. pp. 391-405

MARTECH 2011 Fourth International Workshop on Marine Technology, ISSN 1697-2562, Instrumentation Viewpoint, Fascículo 11 (September 2011)

PARAMETERS FOR THE DESIGN AND CFD SIMULATION OF AN AUV HULL

Fredy A. Aguirre, Francisco Grau, Josep Tornero, *Member, IEEE*

This work was supported by Generalitat Valenciana (VALi+d Program), DIVISAMOS Project () and PROMETEO (Program funded by Conselleria d'educació, Generalitat Valenciana).

Fredy A. Aguirre, Francis Grau and Josep Tornero are with Research Institute of Design and Manufacturing at Universitat Politècnica de València, Camí de Vera, 46022, Valencia, Spain

ABSTRACT

This paper is oriented on the establishment of parameters for the design and CFD simulation of the hull of an AUV, analyzing the results for to obtain a balance between form and hydrodynamic performance. For accomplish the proposed objectives were taken the forms traditionally used and were made simulations, additionally modified these forms for find parameters that would help at establishing a balance given the required dimensions. Once the results were obtained different parameters could be established both environmental conditions of the simulations and the form it should be the hull of the AUV for have a hydrodynamic High Performance

INTRODUCTION

One type of vehicles most used in underwater investigation is the AUV, mainly for their characteristics of autonomy that allows the possibility of to execute fully programmed missions. To achieve extended this autonomy should take into account parameters such as hull shape and hydrodynamic performance, that is why this paper is based on finding a balance between these parameters.

Considering different design rules at the structural level of fundamental importance in the conception of these vehicles, be proposed shape parameters varying the commonly used settings, looking to find a relationship between dimensions most relevant, to get a harmony among these, for accomplish be designed a model to which be were variety of measures to find a relationship between them.

To guarantee the reliability of simulation results and later able to analyze the results, were studied the environment variables set in the CFD simulation environment, such as mesh size and volume of fluid, given that results obtained in simulations may become disturbed by the use of inappropriate values. With tests performed have a margin by which are obtained acceptable results in reasonable time.

Once set a model hull and some appropriate variables, be proceeded to make CFD simulations to validate the relationships found in the previous activities, adjusting so the relationship established between the dimensions of the hull and the simulation environment.

Finally established these parameters were accomplished to create a model hull that met the requirements solicited.

AUV HULL SHAPE

Generate designs that do not cause significant alterations in the boundary layer have enough influence on the hydrodynamic performance of the AUV. A region that severely alters the fluid velocity can generate separation of the boundary layer; this effect is accompanied by an increase in noise and the drag if it occurs in a large region of the hull.

The main parameter that determines the hydrodynamic performance of the hull of an AUV is the relationship between their length and diameter (factor L / D). The ideal shape would imply a variable diameter along the length of the AUV. The following graphic shows the behavior of some of the commonly used forms.

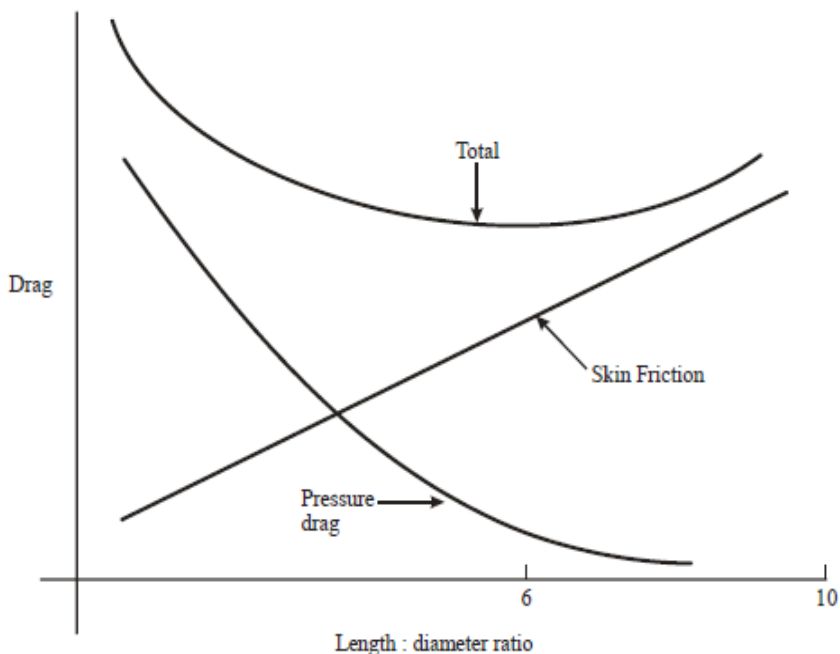


Fig.1. Evolution of drag vs. L/D

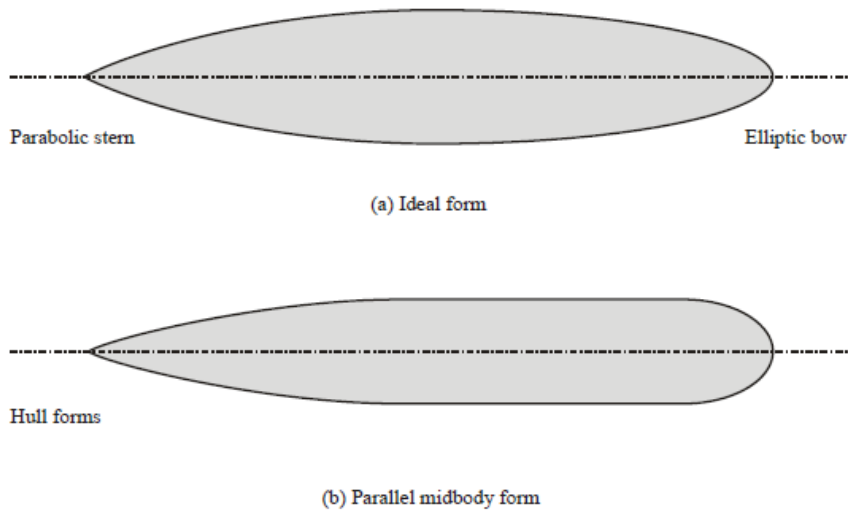


Fig.2. Shape of hull

From the previous graphs we can conclude that, the bow should have an ellipsoidal shape, while the stern should be parabolic shape. In the following illustration shows this configuration, with the red lines.

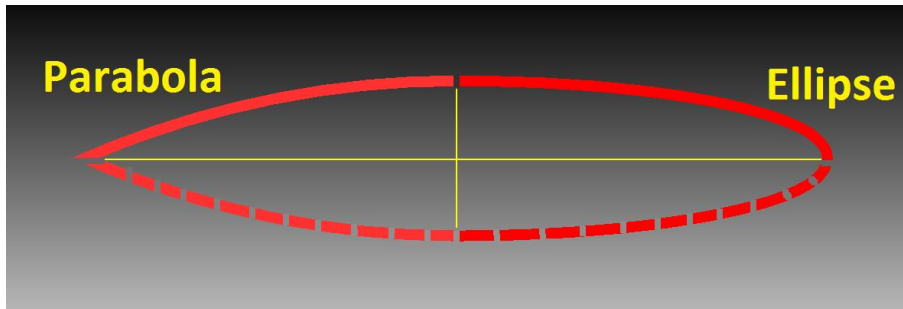


Fig.3. Configuration of hull

A small variation in this shape, considering a central section parallel, would reduce the production costs without a very severe penalty in the drag and noise generated. A great variation not only affects the increased drag and noise, but also imposed limitations on the speed and

the autonomy of the vehicle to increase the effects that oppose at motion.

ANALYSIS OF THE MESH SIZE OF THE VOLUME OF FLUID

When finer the mesh to get a more precise result, but the computation time to use will be higher, moreover the bigger the volume of fluid that envelops the hull in relation at volume of the AUV, more similarly are the boundary conditions to the open sea conditions. Balancing both features be achieved the precision and approach to real behavior of the AUV.

For this analysis be used a hull of volume 0.25m^3 , a relationship L/D of 5 moving at a relative speed with the flow of 10m/s , the turbulence model was used is the mixing length. The analysis has been to test the hull considering a volume of fluid three times the size of the AUV, with different mesh sizes 35, 50, 65, 80 and 100mm (using 35mm as reference at be the finest mesh). The results obtained are shown below.

TABLE I
ANALYSIS OF THE MESH SIZE OF THE VOLUME OF FLUID

Mesh mm	Force Variation		
	Drag (N)	Shearing (N/m^2)	Pressure (N/m^2)
100	3,50E+06	4,02E+05	3,17E+06
80	2,52E+06	4,65E+05	2,07E+06
65	2,38E+06	4,83E+05	1,91E+06
50	2,42E+06	4,96E+05	1,93E+06
35	2,27E+06	5,54E+05	1,72E+06

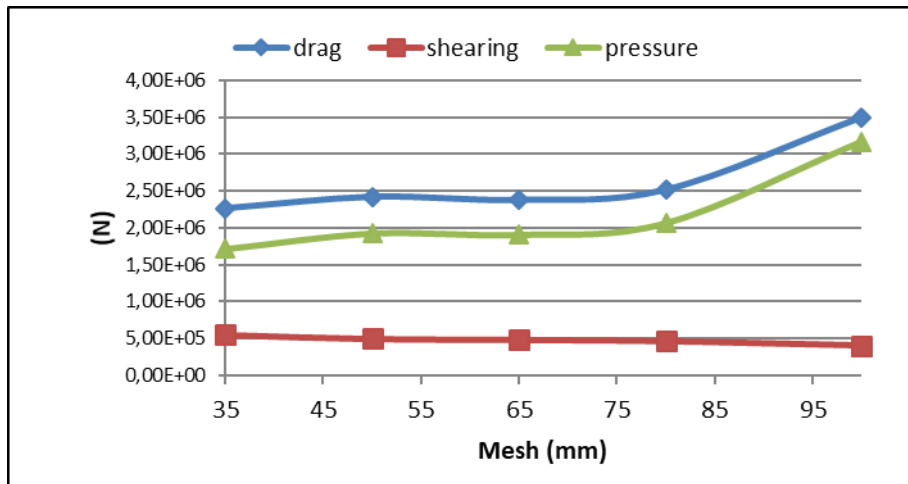


Fig.4. Analysis of the Mesh size of the Volume OF Fluid

The graph shows that the most sensitive to variation of the mesh size is drag. As for the variation in results, in coarse mesh sizes (100mm) there are large variations in reference values (84% in shear, pressure 20.5% and 54.3% in the drag), by In contrast these variations is stabilized between mesh sizes 50 and 65mm, taking values of 5-6% in the drag force, and a 11-13% in the other components; then considering that the value used should be below 65mm.

ANALYSIS OF THE SIZE OF THE VOLUME OF FLUID

The volume of fluid in which simulations are made could influence the results obtained on the surface of AUV analyzed, to determine this influence is realize the following analysis. Was used a hull with the same characteristics as previous, volume that envelops the hull varies in size from 2 times the maximum dimensions of the hull, up to 6 times(taking 6 times as a reference being where should have less influence). The results obtained are as follows.

TABLE II
ANALYSIS OF THE SIZE OF THE VOLUME OF FLUID

Size Volume	Force Variation		
	Drag (N)	Shearing (N/m ²)	Pressure (N/m ²)
2	3,50E+06	4,02E+05	3,17E+06
3	2,50E+06	3,52E+05	2,17E+06
4	2,30E+06	3,34E+05	1,99E+06
5	2,18E+06	3,29E+05	1,86E+06
6	2,19E+06	3,29E+05	1,88E+06

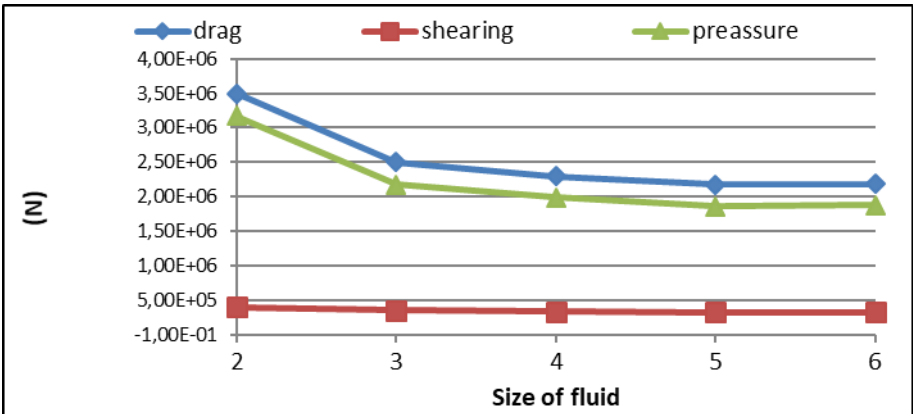


Fig.5. Analysis of the size of the volume of fluid

The previous figure can be seen that the drag is the parameter that reaches higher values, taking into account this will be a critical parameter to define the relationship L/D , also is evident as the magnitude of the drag decreases with increasing the relationship L/D . Given the characteristics necessary in an AUV, can consolidate models that have an L/D of at least 5, to have a balance in all analyzed values.

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP L/D

In these simulations has changed the relationship between the length and diameter of the hull considered the volume remains constant and equal to 0.25m^3 . Were used relationship L / D between 3 and 10 at regular intervals of one unit. The following graphics be explained this relationship.

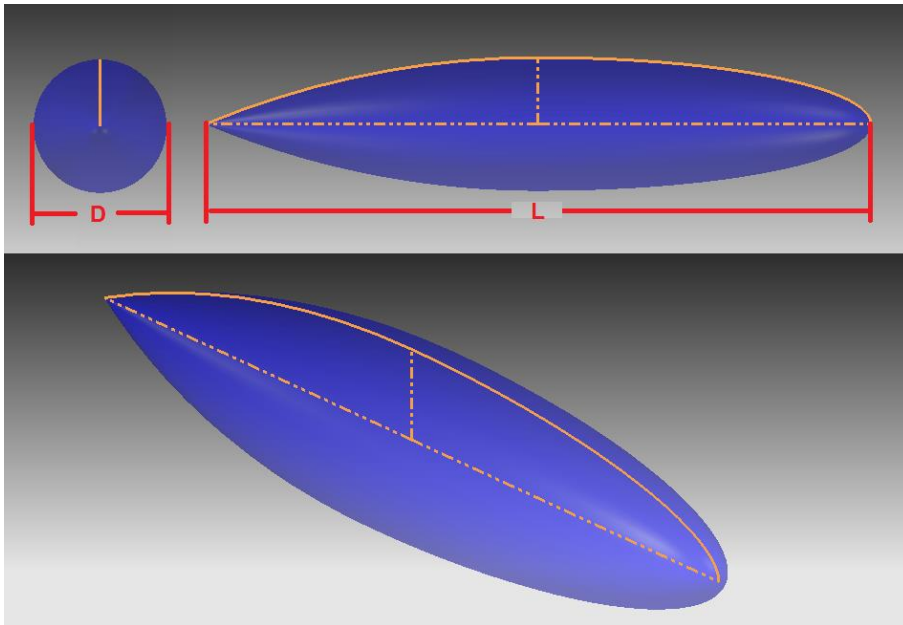


Fig.6. Relationship L/D

As for the conditions of the simulations, the body is immersed in a prismatic volume three times greater than their maximum dimensions, in which the fluid enters on the side of the bow of the hull at a speed of 10 m/s and exits the other side without any kind of suction. Has been considered a 2D mesh 35mm for meshing the hull surface, while for the volume of fluid has been used a 3D mesh of size 50mm element. The turbulence model used has been the mixing length. The following Images shows boundary conditions where have been done the simulations.

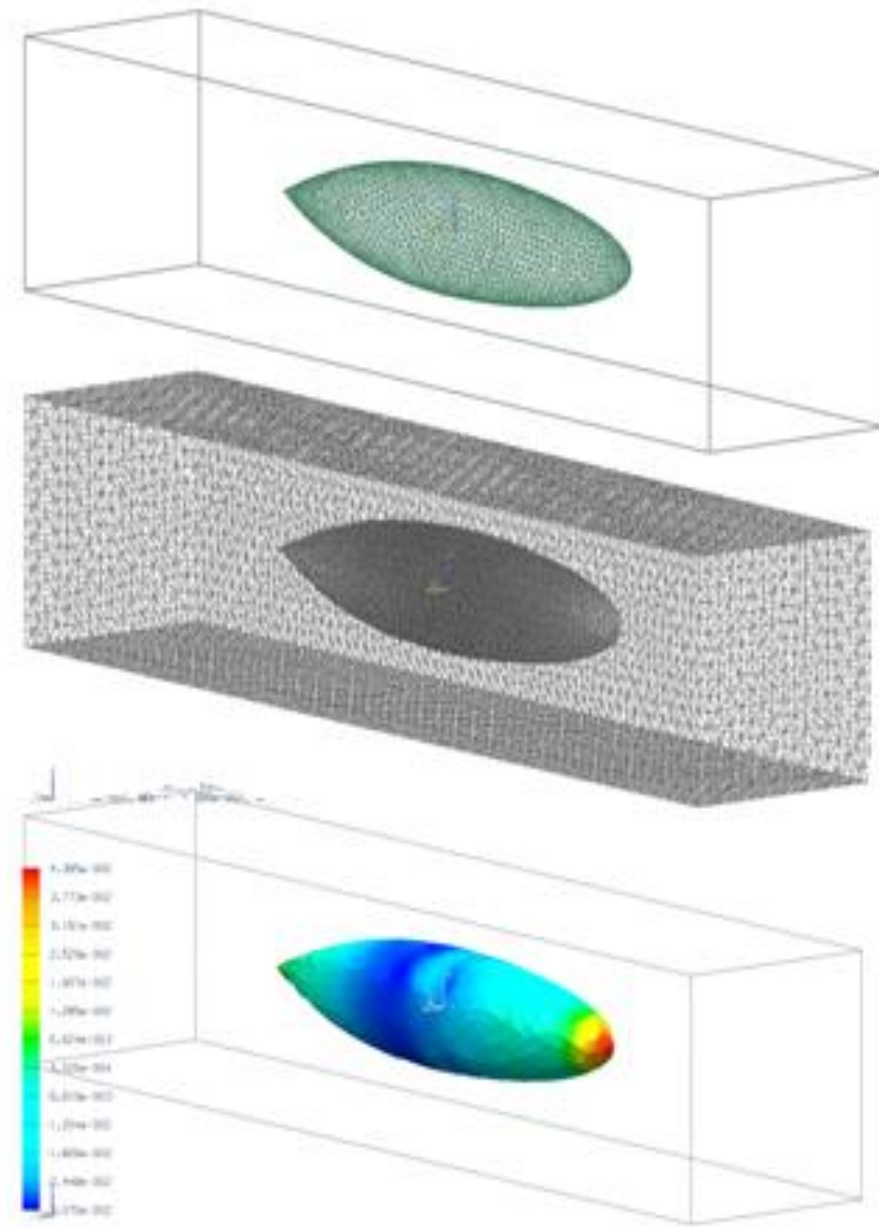


Fig.6. Configuration obtained for a body of 40% a straight section

The following are the results obtained

TABLE III
RELATIONSHIP L/D

L/D	Force Variation		
mm/mm	Drag (N)	Shearing (N/m ²)	Pressure (N/m ²)
3	4300	436,8	3866
4	3108	473,9	2639
5	2421	495,5	1926
6	2140	545,1	1605
7	1946	555,5	1411
8	1786	590,6	1193
9	1702	599,6	1111
10	1637	627,9	1009

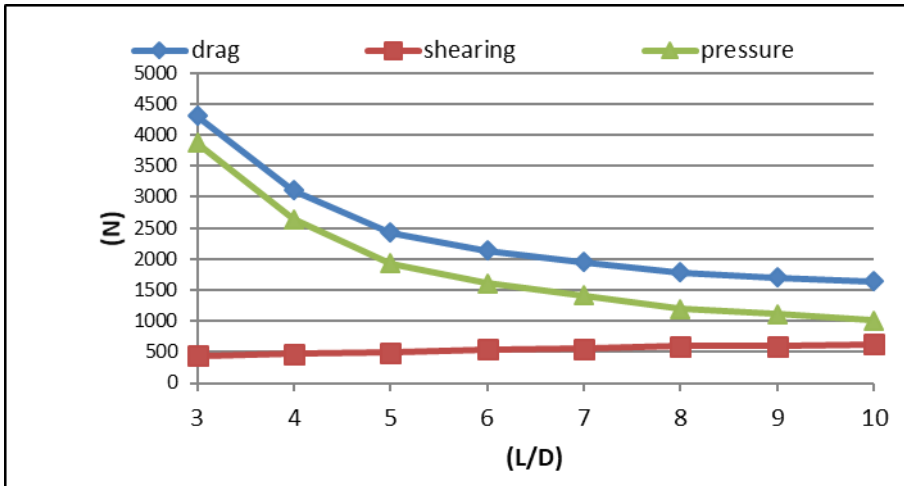


Fig.5. Analysis of the size of the volume of fluid

In the graphics previous can be seen that the drag is the parameter that reaches higher values, taking into consideration this will be a criti-

cal parameter to define the relationship L/D , Also is evident as the magnitude of the drag decreases with increasing the relationship L/D . Given the characteristics necessary in an AUV, can be consolidate models that have an relationship L/D of at least 5, to have a balance in all tested values.

VARIATION AND ANALYSIS OF THE STRAIGHT SECTION

Has been considered including a straight section in the middle region of the hull, the total length of the AUV is fixed and equal to 2000mm and having into account the results of previous simulations, is have an L/D of 5. Additionally consider the variation of the straight section based on a percentage of body length, analyzed from 0 to 70% of the total, value of variations of 10%. As for the conditions of the simulations, the body is immersed in a prismatic volume three times greater than their maximum dimensions, in which the fluid enters on the side of the bow of the hull at a speed of 10 m/s and exits the other side without any kind of suction. Has been considered a 2D mesh 35mm for meshing the hull surface, while for the volume of fluid has been used a 3D mesh of size 50mm element. The turbulence model used has been the mixing length. The following Images shows the configuration obtained for a body of 40% a straight section, just as the other hulls is created for all combinations.

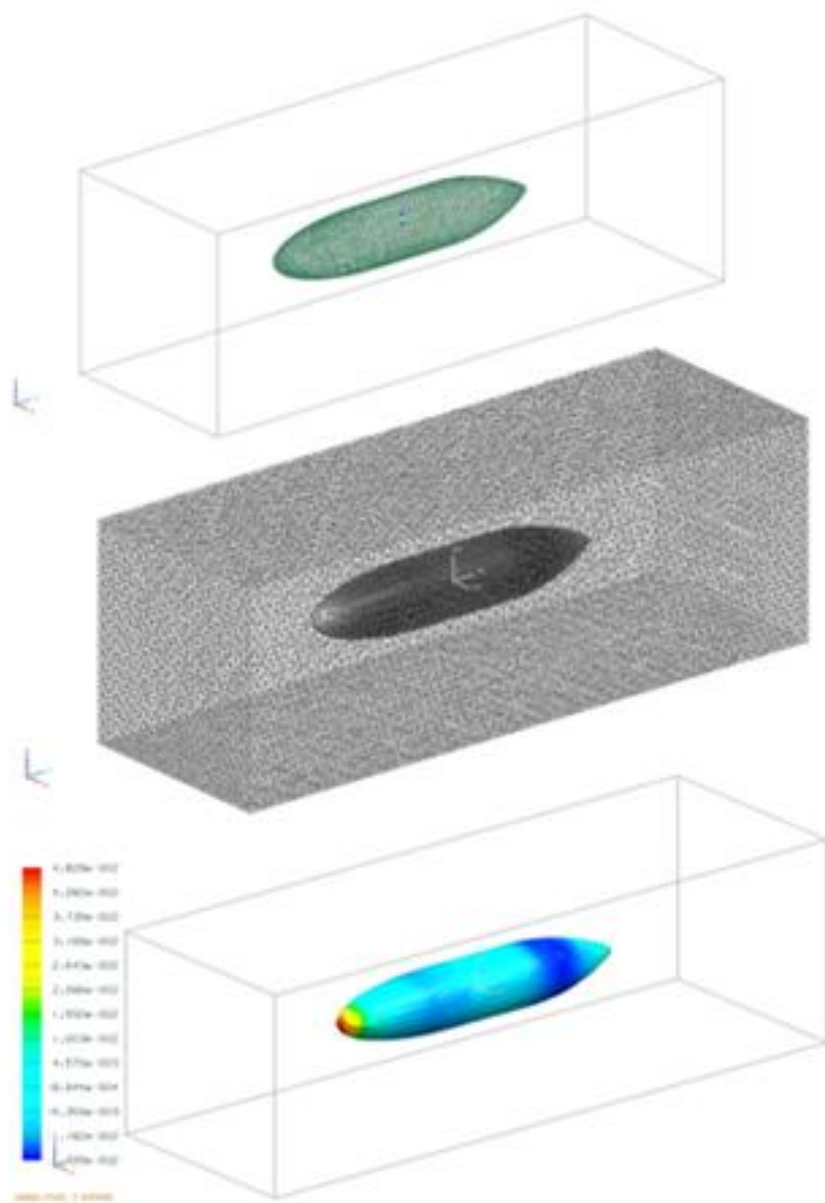


Fig.6. Configuration obtained for a body of 40% a straight section

The following are the results obtained

TABLE III
VARIATION AND ANALYSIS OF THE STRAIGHT SECTION

SS*	Force Variation		
(%)	Drag (N)	Shearing (N/m ²)	Pressure (N/m ²)
0	1671	329,8	1343
10	1678	328,6	1353
20	1741	317,5	1427
30	2140	339,8	1671
40	1671	329,8	1343

*Straight Section

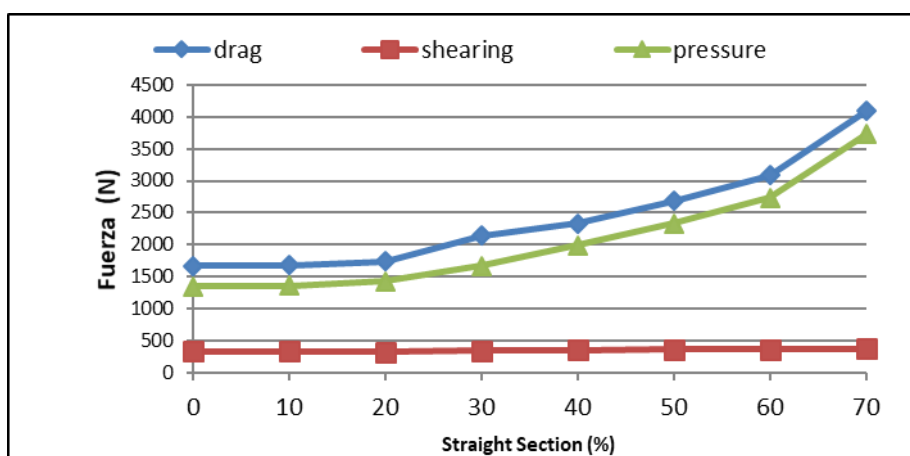


Fig.7. Variation and analysis of the straight section

Was evident that while the shear are practically constant, values of drag and pressure increase according as the straight section increase, of what can be concluded that no are good straight sections more than 30% of the total length of the AUV.

$$F_H = K \cdot v_R^2 \begin{cases} F_H^i(\beta, \alpha)^i = K(\beta, \alpha) \cdot (v_R^i(\beta, \alpha))^2 \\ F_H^o(\beta, \alpha) = K(\beta, \alpha) \cdot (v_R^o(\beta, \alpha))^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$F_H^i(\beta, \alpha)^i = \frac{F_a^o(\beta, \alpha)}{(v_R^o(\beta, \alpha))^2} \cdot (v_R^i(\beta, \alpha)^i)^2 \quad (4)$$

CONCLUSIONS

Knowing the typical forms of hull for the AUV, were made variations to them to reach to consolidate a shape that has a balance between the drag force generated and existing stress.

Based on the previous conclusion will be made simulations with a hull that will bow in the ellipsoidal shape and stern with a parabolic shape that be reduced the adverse effect of friction, generated by the boundary layer detachment.

In the analysis of the effect that was the size of the mesh of the fluid volume, be concluded that values below 65 mm could be achieved reliable results.

In the analysis of the influence that presented the size of the volume of fluid in the results, be came to the conclusion that with a volume three times greater is sufficient to obtain acceptable results.

Analyzing the shape proposed was seeking the more convenient relationship for the L / D at constant volume, concluding that a relationship of 5 times it was the most balanced to obtain acceptable values of resistance.

Was thought the inclusion of a straight section with the which lower the manufacturing costs, of this can be concluded that no are good straight sections more than 30% of the total length of the AUV to the values of stresses generated.

After analyzing the variation of the drag force at change the velocity, can be say that the increase of this force occurs form quadratically.

Was able to establish a mathematical relationship which be can generate drag forces results without having to make many simulations.

As might be expected analyzing the equation from which we calculate the drag, depending on the contact surface, the values increase more relevant taking the angles at which the contact area is larger.

REFERENCES

- [1] Matt, Robert L “Applied fluid mechanics” Prentice Hall, 2007.
- [2] Roberson, John A “Engineering fluids mechanics” John Wiley & sons, New York 1997.
- [3] Matt, Robert L “Applied fluid mechanics, Prentice Hall” Singapore 2006.
- [4] Rodi, Wolfgan “Turbulence models and their application in hydraulics: a state of art review” A.A Salkema, Rotterdam 2000.
- [5] Jowbert, P.N “Some apects of submarine design” Part1. Hydrodynamics, DSTO. Platforms Sciences laboratory, Victoria 2004.
- [6] Ostafichuk, Peter M “AUV hydrodynamics and modeling improved control” University of British Columbia, 2004.
- [7] M. Luis Perez Rojas, Jan Miguel Sánchez, Ricardo Zamora Rodríguez “la calidad en el software. Validación de CFD” Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales UPM, 2008.
- [8] ANSYS Fluent INC, “A Brief History of Computacional Fluid Dynamics” 2008.
- [9] T. Briet Blanes, “Simulación CFD” The FL.com, 2009.
- [10] T. Briet Blanes, “Apoyo Técnico CFD” congreso internacional de ingeniería mecánica, Diseño industrial, vol 24, 2006.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras de investigación

6 Conclusiones, aportaciones principales y líneas de futuras investigaciones

El desarrollo de cada uno de los capítulos que componen esta tesis, ha dejado un aporte significativo para futuras investigaciones en el área de la robótica submarina, adicionalmente con los conocimientos adquiridos en toda esta investigación se abrieron diferentes líneas de estudio, que puede enriquecer a un más este campo de la robótica móvil.

A continuación se presentan puntualmente los aportes y las líneas futuras de investigación que se pueden plantear.

6.1 APORTACIONES PRINCIPALES DEL ESTADO DEL ARTE

Establecer el estado del arte permite tomar como punto de partida las experiencias, resultados y avances de los estudios de otros investigadores en el área. Con la información encontrada y el análisis realizado a la misma, se puede concluir con varios parámetros de diseño; conocer las características de la gran mayoría de los UV's existentes garantiza un avance en firme. A continuación se presentan las conclusiones referentes al estado del arte.

- i. De los diferentes sistemas de operación encontrados en los UV's el sistema autónomo implementado por los AUV's, es el más versátil ya que no presenta ninguna conexión física que limite su maniobrabilidad, profundidad de operación o distancia de desplazamiento; en esas condiciones se alcanzan las cotas de inmersión más altas, además de las velocidades más altas, si la misión que se desarrolla lo amerita. Con todo lo anterior se puede asegurar que el AUV es el sistema de operación más recomendado.
- ii. Las formas más hidrodinámicas reducen la fuerza de arrastre, reducir la fuerza de arrastre repercute directamente en dos aspectos importantes, velocidad de desplazamiento y energía gastada para desplazarse, a su vez realizar una misión más rápido y con menos gasto de energía redundan en un aumento de autonomía, o sea, más horas de trabajo sin necesidad de detenerse a recargar la fuente de energía. Las formas que permiten alcanzar la mayor velocidad son las que menos fuerza de arrastre ejercen, con esto, la forma de gota de agua y torpedo son las más hidrodinámicas, por el contrario los UV's de estructura abierta son los menos hidrodinámicos.

- iii. Poseer un vehículo versátil permite la ejecución de mayor cantidad y más variedad de misiones; teniendo en cuenta los tipos de misiones que se plantearon (investigación, comercial y militar) se puede considerar que un UV que tenga presencia en la mayor cantidad tipos planteados, cumple con la condición de ser versátil, para este caso nuevamente es el AUV el que mejor alcanza estos requerimientos, ya que hace presencia en los 3 tipos de misiones.
- iv. Alcanzar inmersiones más profundas significa tener materiales que soporten mayor presión hidrostática, la información analizada dejó ver, que uno de los materiales que mejor soporta estas condiciones es la fibra de carbono, no obstante, el aluminio también demostró una gran acogida, con esto deben ser dos materiales a tener en cuenta.
- v. La velocidad máxima de un UV está directamente relacionada con su forma y a su vez, la forma está relacionada con el material en que se fabrica, debido a las características propias de los materiales resulta más fácil y económico conseguir formas hidrodinámicas con unos materiales que con otros, la fibra de vidrio con una de las velocidades más alta demostró que cumple con los requerimientos necesarios para fabricar formas hidrodinámicas y además, basado en los métodos de fabricación que se pueden implementar, se puede asegurar que también resulta económica.
- vi. El funcionamiento de algunos sensores se puede ver afectado por propiedades particulares de cada material, específicamente los materiales metálicos, la implementación de materiales compuestos como la fibra de vidrio y la fibra de carbono, evitan es-

tos inconvenientes, además el desarrollo exponencial que presentan los materiales compuestos hace prever, que en un futuro pueden ser los únicos materiales que se usen en la fabricación de UV's.

- vii. Basados en las características propias de las misiones de acuerdo a su clasificación, de forma general se puede ver que el promedio de velocidad está entre los 2 y 3 m/s. Este valor es una condición importante para determinar un sistema de propulsión, pues se puede considerar que alcanzando este rango de velocidad, se está dentro de los promedios de la mayoría de UV's.
- viii. El porcentaje más alto de las misiones realizadas por UV's, se encuentra ente 0 y 100 metros con un 38 %, se puede asegurar que aunque puede considerarse poca profundidad es el nicho de estudio más recurrente.
- ix. El modelado matemático de la mayoría de los vehículos analizados, le restan importancia a la fuerza de arrastre, no porque no la incluyan si no porque la toman como una constante aun cuando esta se ve afectada en gran medida por las múltiples variables de la misma. Además la proporción de la energía destinada a vencer la fuerza de arrastre resulta alta, motivo para buscar los mecanismos necesarios para reducirla.

6.2 APORTACIONES PRINCIPALES EN EL DISEÑO

Con el análisis propuesto de aislar los requerimientos, la solución está en la construcción de dos cascos alojando uno en el interior del otro, para cumplir individualmente con los requerimientos planteados, en otras palabras un casco que resista hidrostáticamente en el interior y otro con forma hidrodinámica en el exterior, de igual manera se pueden usar dos materiales diferentes para alcanzar los requerimientos.

En el análisis del estado del arte se evidenció que los UV's de estructura abierta, eran los más lentos en cuanto a velocidad de desplazamiento se refiere, mientras que los vehículos de forma torpedo, ovalado y gota de agua eran los más veloces, la posibilidad de alcanzar altas velocidades está relacionada con los fuerzas de arrastre bajas.

El diseño mecánico del AUV ORCA 300 para el proyecto DIVISAMOS, contó con un proceso investigativo que abarcó métodos que optimizaron las características del vehículo. Se planteó que el vehículo contara con la infraestructura necesaria para incorporar sistemas sensorizados que permitan aplicaciones de vigilancia, mapeo, batimetría de ecosistemas acuáticos con generación de datos geo-referenciados de alta resolución del fondo marino y su proyección cartográfica.

- i. Establecer los parámetros de diseño brinda las pautas para enfocar los resultados, a los que se pretende llegar satisfaciendo los requerimientos del ORCA 300.
- ii. El diseño propuesto de doble casco permitió cumplir con dos aspectos puntuales, dar resistencia hidrostática para permitir un rango de inmersión que permita realizar las misiones planteadas, y tener una forma hidrodinámica.

Capítulo 6 Conclusiones, aportaciones principales y líneas de futuras investigaciones

- iii. El sistema de cierre diseñado brinda una solución práctica, que complementa el funcionamiento del casco hidrostático, poder cerrar herméticamente para proteger elementos electrónicos y destapar con facilidad, simplifica la ejecución de actividades que requieren, de la interacción directa con el sistema de alimentación de energía o el sistema de control.
- iv. Encontrar el parámetro de la relación L/D , garantizó la reducción de la fuerza de arrastre y fue un avance fundamental en el propósito de plantear una forma hidrodinámicamente eficiente, para cumplir con el requisito de la velocidad máxima de operación del ORCA 300, el valor de 5 de la relación L/D permitió diseñar el casco hidrostático.
- v. La posibilidad de flotar sin estar desplazándose (Hovering) posibilita la opción de realizar misiones de observación, esta es una característica que los AUV con forma torpedo no pueden lograr. El ORCA 300 puede lograrlo sin perder las características de la forma hidrodinámica que permite alcanzar altas velocidades.
- vi. El volumen considerable que tiene el ORCA 300, permite llegar a alojar sensores o dispositivos para múltiples misiones, esto se denomina *PAYLOAD* que es la carga útil de vehículo, existe la posibilidad de brindar servicios para centros de investigación, que necesiten la toma de muestras pero no cuenten con un AUV.
- vii. La ecuación planteada para hallar los valores de fuerza de arrastre disminuyen el costo computacional de hacer simulaciones CFD, este aporte se puede aprovechar en el modelo matemático incluyendo un valor de fuerza de arrastre, que en la mayoría de los modelos lo consideran constante, pero con esta fórmula y unos valores base, es posible calcular con mayor aproximación y en tiempo real el valor de la fuerza.

6.3 APORTACIONES PRINCIPALES DE LA FABRICACIÓN

El uso de herramientas CAM como el modulo suministrado por el NX contribuyó al correcto desarrollo del proyecto, ya que se pudo corroborar previamente que los códigos de mecanizado no tenían errores.

- i. El proceso de selección de materiales, se vio simplificado ya que en los capítulos de análisis del estado del arte y diseño del AUV, se especificaron cuáles deberían ser los materiales que se implementarían en la fabricación.
- ii. La selección de la fibra de vidrio fue acertada ya que a pesar de que el casco hidrodinámico tiene una forma compleja, se pudo fabricar sin ningún inconveniente.
- iii. El acetal ha sido una buena elección, permitió acoplar el casco hidrostático y los sensores a la estructura de fijación que se diseñó.
- iv. La estructura de fijación se ajustó perfectamente a las necesidades del ORCA 300, además al no tener los mismos materiales a pesar de que estén en contacto se garantiza que no ocurrirá corrosión galvánica.

6.4 APORTACIONES PRINCIPALES DEL MODELADO DINÁMICO Y CINEMÁTICO

- i. El uso de la herramienta creada para determinar la fuerza hidrodinámica reduce el costo computacional que conllevan las simulaciones CFD, además permite que los análisis hechos con modelos matemáticos sean más precisos, ya que muchos modelos normalmente toman la fuerza hidrodinámica como una constante.
- ii. La posibilidad de simular el comportamiento del ORCA 300 debido a las fuerzas hidrodinámicas generadas por una corriente de agua, hacen de la herramienta de simulación un valioso elemento para la investigación en AUV.
- iii. Aunque no se cuenta con ningún mecanismo para ejercer giro alrededor del eje X (roll), la disposición de los elementos y por ende el centro de masa en la parte inferior y el centro de flotación en la parte superior, gracias a la espuma, generan una corrección natural por el torque que producen estos dos, manteniendo el vehículo alineado.
- iv. El uso de Matlab® Simulink facilita las actividades de modelado matemático de fenómenos físicos, ya que cuenta con toolbox versátiles que se ajustan a las particularidades de cada caso.
- v. La implementación de la metodología del modelado matemático de un brazo robot en el modelo matemático de un AUV es algo nunca antes visto, que además de comprobar su efectividad garantiza más facilidad para el modelo cuando se instalan brazos robot en un AUV ya que no hay combinación de diferentes metodologías.

6.5 LÍNEAS DE FUTURAS INVESTIGACIONES

A lo largo de esta tesis doctoral se han realizado varios comentarios referentes a futuros estudios, dando así continuidad a esta investigación. A continuación se exponen diferentes líneas de investigación a llevar a cabo en el futuro.

- Implementar el uso de energías alternativas como fuente de alimentación de AUV, esto permitiría aumentar la autonomía de misiones reduciendo así las paradas para hacer recargas de baterías.
- Analizar y evaluar el empleo de materiales no convencionales en la fabricación de un AUV, principalmente la incorporación de materias primas recicladas.
- Implementación de redes neuronales en el modelado y análisis CFD, esto puede robustecer todas las actividades enfocadas a la simulación del comportamiento del AUV, en condiciones específicas. Teniendo en cuenta que las redes neuronales son sistemas que aprenden y se forman a sí mismos, esto hace que los resultados en aplicaciones donde la detección de soluciones o características es difícil de expresar con la programación convencional. Los análisis realizados con las simulaciones CFD revisten complejidad que podría ser minimizado con redes neuronales ya que estas permiten la implementación de un modelo para encontrar una combinación de parámetros y aplicarla al mismo tiempo para reducir la función de pérdida que está directamente relacionada con el error.
- Diseño del sistema de control automático para el AUV ORCA300, El control automático permitirá mejorar la navegación reduciendo la intervención humana para el seguimiento de una trayectoria. Esto garantizará que la calidad de la informa-

ción recompilada en una misión sea de la calidad esperada. Algunas de las variables que podrían ser vigiladas con el sistema de control son: la posición, la velocidad y el consumo energético entre otras.

- El objetivo de la red neuronal es resolver los problemas de la misma manera que el cerebro humano, aunque las redes neuronales son más abstractas. Las redes neuronales actuales suelen contener desde unos miles a unos pocos millones de unidades neuronales.
- Acoplamiento de un brazo robot (mismo método matemático para el modelado), para el desarrollo de misiones en donde sea necesario tener un manipulador de objetos tales como aparatos de ensayos no destructivos.

REFERENCIAS

En este capítulo se presentan todas las referencias que han sido consultadas para la realización del trabajo de investigación.

- [1] Valdés Ruiz Diego, «Estado del Arte de la Robótica Submarina,» 2010.
- [2] Blidberg D. Richard, «The Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUV),» Hampshire, USA, 2003.
- [3] Ruiz Antonio, «Diseño de un Sistema autónomo para un Vehículo Submarino,» Barcelona, 2009.
- [4] Sosa Pedro, «Nociones sobre sumergibles de recreo,» 2007.
- [5] Grau C. Francisco, «Parametrización del casco de un AUV,» 2009.
- [6] Ostafichuk Peter M., «AUV hydrodynamics and modeling for improved control,» 2004.
- [7] Blidberg, D.R., Jalbert, J.C., and Ageev, M.D., , « AUSI (Autonomous Undersea Systems Institute) International Advanced Robotics Program,» 1998.
- [8] R. O. A. Galo, «Diseño de un Sistema autónomo para un Vehículo Submarino,» 2009.
- [9] O. A. ,. A. J. Oliver Gabriel, «Guiado y Posicionado de un AUV para Inspección de Cables y Emisarios Submarinos».

- [10] <http://auvac.org/resources/search/>, «BASE DE DATOS AUVAC.».
- [11] T. A. F. -. A. f. U. V. S. International, «<http://www.auvsifoundation.org/AUVSI>».
- [12] E. H. I. GAVIA, «<http://www.gavia.is/>».
- [13] R. L. Matt, « Applied fluid mechanics,» 2007.
- [14] J. A. Roberson, «Engineering fluids mechanics,» 1997.
- [15] W. Rodi, «Turbulence models and their application in hydraulics: a state of art,» 2008.
- [16] P. Jowbert, «Some aspects of submarine design; Part1. Hydrodynamics, DSTO. Platforms Sciences laboratory,» 2004.
- [17] P. N. Jowbert, «“Hydrodynamic design,” in Some aspects of submarine design, Part1, DSTO. Platforms Sciences laboratory,» 2004.
- [18] W. Rodi, «“Turbulence Modeling,” in Turbulence models and their application in hydraulics: a state of art review,» 2000.
- [19] G. A. P. Ridao, «Robot Autónomo para la inspección de presas,» 2010.
- [20] P. N. Jowbert, «Hydrodynamic design, in Some aspects of submarine design, Part1, DSTO. Platforms Sciences laboratory,» 2004.
- [21] P. J., I. Schjølberg, J. T. Gravdahl, K. Y. Pettersen and T. I. Fossen, «On the Boundedness and Skew-Symmetric Properties of the Inertia and Coriolis Matrices for Vehicle-Manipulator

Systems. Proc. of the 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles,» 2010.

- [22] H. F. T. I. F. T. A. J. a. A. S. Grip, «Attitude Estimation Using Biased Gyro and Vector Measurements with Time-Varying Reference Vector,» *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012.
- [23] Grip, H. F., T. I. Fossen, T. A. Johansen and A. Saberi, «Attitude Estimation Based on Time-Varying Reference Vectors with Biased Gyro and Vector Measurements,» *Proc. of the IFAC World Congress*, 2011.
- [24] H. F. T. I. F. T. A. J. a. A. S. Grip, «Integrated Satellite and Inertial Navigation with Gyro Bias Estimation and Explicit Stability Guarantees,» *The American Control Conference*, 2012.
- [25] C. D. A. B. a. T. I. F. Holden, «Frequency Detuning Control by Doppler Shift,» *Parametric Resonance in Dynamical Systems*, Springer, 2011.
- [26] C. T. P. a. T. I. F. Holden, «A Lagrangian Approach to Nonlinear Modeling of Anti-Roll Tanks,» *Ocean Engineering*, 2011.
- [27] Perez, T. and T. I. Fossen, «Practical Aspects of Frequency Domain Identification of Dynamic Models of Marine Structures from Hydrodynamic Data,» *Ocean Engineering*, vol. Vol. 38, pp. pp. 426-435, 2011.
- [28] Peymani, E. and T. I. Fossen, «A Lagrangian Framework to Incorporate Positional and Velocity Constraints to Achieve PathFollowing Control,» *the IEEE Conference on Decision and Control*, 2011.

- [29] Peymani, E. and T. I. Fossen, «Motion Control of Marine Craft Using Virtual Positional and Velocity Constraints,» *IEEE ICCA'11*, 2012.
- [30] Peymani, E. and T. I. Fossen, «Path Following and Coordinated Control of Underwater Robots using Lagrangian Mechanics and Lagrange Multipliers,» *Robotics and Autonomous Systems (special issue on Advances in Autonomous Underwater Robotic)*, Elsevier.
- [31] Skejic R., M. Breivik, T. I. Fossen and O. M. Faltinsen, «Modeling and Control of Underway Replenishment Operations in Calm Water,» *Proceedings of the IFAC CAMS'10*.
- [32] Breu, D. A. and T. I. Fossen., «Extremum Seeking Speed and Heading Control Applied to Parametric Roll Resonance.,» *Proceedings of the IFAC CAMS'10*, 2010.
- [33] Breu, D. A., C. Holden and T. I. Fossen., «hip Model for Parametric Roll Incorporating the Effects of Time Varying Speed.,» *"Parametric Resonance in Dynamical Systems" Springer (T. I. Fossen and H. Nijmeijer, Eds.)*, vol. Chapter 9, 2011.
- [34] Breu, D. A., C. Holden and T. I. Fossen., «Stability of Ships in Parametric Roll Resonance Under Time Varying Heading and Speed.,» *the International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*.
- [35] Breu, D. A., L. Feng and T. I. Fossen., «Optimal Speed and Heading Control for Stabilization of Parametric Oscillations in Ships,» *Parametric Resonance in Dynamical Systems, Springer*, vol. Chapter 11, 2011.

- [36] T. I. a. H. N. Fossen, «Parametric Resonance in Dy-namical Systems,» *Springer*, 2011.
- [37] Fossen, T. I., «Nonlinear Maneuvering Theory and Path Following Control,» *Centre for Marine Technology and Engineering (CENTEC) Anniversary Book, Instituto Superior Tecnico*.
- [38] T. I. Fossen, «Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, John Wiley and Sons Ltd.».
- [39] P. J., I. Schjøberg, J. T. Gravdahl, K. Y. Pettersen and T. I. Fossen, «On the Boundedness Property of the Inertia Matrix and Skew-Symmetric Property of the Coriolis Matrix for Vehicle-Manipulator Systems,» *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2010.
- [40] Grip, H. F., T. I. Fossen, T. A. Johansen and A. Saberi, «Integrated Satellite and Inertial Navigation with Gyro Bias Estimation and Explicit Stability Guarantees,» *Submitted to the American Control Conference*, 2012.
- [41] Holden, C. and T. I. Fossen, «A UTank Control System for Ships in Parametric Roll Resonance,» *Parametric Resonance in Dynamical Systems, Springer*, vol. Chapter 12, 2011.
- [42] Holden, C., D. A. Breu and T. I. Fossen, «Frequency Detuning Control by Doppler Shift,» *Parametric Resonance in Dynamical Systems, Springer*, vol. Chapter 10, 2011.
- [43] Holden, C. and T. I. Fossen, «A Lagrangian Approach to Nonlinear Modeling of Anti-Roll Tanks,» *Ocean Engineering*, vol. Vol 38, pp. pp. 341-359, 2011.

- [44] Jensen, G. A., N. Säfström, T. D. Nguyen and T. I. Fossen, «A Nonlinear PDE Formulation for Offshore Vessel Pipeline Installation,» *Ocean Engineering*, vol. Vol. 37, pp. pp. 365-377, 2010.
- [45] Jouffroy, J. and T. I. Fossen, «A Tutorial on Incremental Stability Analysis using Contraction Theory,» *Modeling, Identification and Control*, pp. p.p.93-106, 2010.
- [46] Perez, T. and T. I. Fossen, «Motion Control of Marine Craft,» *The Control Systems Handbook: Control System Advanced Methods (2nd Edition)*, vol. Chapter 33, 2011.